

## レール波状摩耗の光学的測定の試み

九州大学工学部	地球環境工学科	学生会員	井上	公洋
九州大学工学部	工学府	学生会員	河瀬	庸平
九州大学工学部	工学研究院	正会員	壇	和喜
九州大学工学部	工学研究院	正会員	角	知憲

### 1. はじめに

鉄道のレール劣化現象の一つに波状摩耗が挙げられる。波状摩耗は、波長数センチから数十センチまでの正弦波状の摩耗がレール頭頂面に現れるものであり、これが生長すると騒音と振動を著しく増大させ、軌道破壊を引き起こす可能性がある。このため、管理基準が定められて、波状摩耗のある程度の進行でレールを研削することが行われるようになってきた。

通常、波状摩耗の測定に用いられるのは、直線ゲージ上を、探触子を搭載したカーソルを移動させ、探触子の動きを機械的に拡大する装置である。この方法では装置がスムーズに作動するためには比較的大きな公差が必要となるため、信頼し得る測定精度は1/10mmのオーダーである。ルーチ的な管理ではなく摩耗の発生と生長のプロセスを定期的に現場で詳細に観測したり、研削後のレール表面の仕上がりを検証しようとする場合には、さらに高い精度、おそらく1/100mm程度の測定精度が必要となるであろう<sup>2), 3)</sup>。

そこで本研究では、現場において1/100mmオーダーの精度で表面形状を測定するため光学的な測定方法を検討してみる。

### 2. 波状摩耗の測定原理<sup>1)</sup>

微小なレール波状摩耗を測定するためには、高精度のセンサーとその検知位置をレール長手方向に変化させる仕組みが必要である。提案する測定方法は、比較的厳密な平行光源と高感度な光検出器が容易に利用可能になったことを利用して、この肉眼での検知を機器化しようとするものである。

図-1に波状摩耗の測定原理を示す。レール上方にレールと平行にスクリーンが設置されている。レール頭頂面に浅い角度で平行光線を照射すると、レール頭頂面で反射し、上方のスクリーン上に投影される。レール頭頂

面に波状摩耗が生じていれば、凹凸によって反射の方向が乱れスクリーン上に光の濃淡が現れる。いま、レール長手方向にx軸を取り、y軸を頭頂面に取る。頭頂面に一定のエネルギー密度  $E(\text{w/m}^2)$  を持つ光が入射しているものとすれば、x軸上の微小区間  $dx$  に照射される光のパワーは、 $E \cdot dx$  である。もしレール頭頂面が平面であれば、反射光も図の破線に示されるように平行で、そのパワーは  $E \cdot \gamma \cdot dx$  となる。ここに  $\gamma$  は、レール頭頂面における吸収や側方への散乱の効果と考えた反射率である。もしレール頭頂面が平面でなく、位置によって傾きが異なれば、もはや反射光は平行光線ではない。頭頂面での傾きを  $\theta(x)$  とすると、

$$\theta(x) = \frac{dy}{dx}$$

である。図-1に示したように、反射面に立てた垂線も  $\theta(x)$  だけ傾くので、この垂線に対して入射光と対称な反射光の進路は  $2\theta$  だけ傾く。その結果、図のレール頭頂面上の微小区間  $dx$  に入射した光のエネルギーは、スクリーン上の微小区間  $d\ell$  に投影されることになる。

$$d\ell = dx + d\ell_1 + d\ell_2 \quad (1)$$

ここに  $d\ell_i (i=1,2)$  は微小区間  $dx$  の両端に入射した光の反射光の、スクリーン上の偏奇量である。

ここで、 $L(x)$  をレールからスクリーンまでの反射光の光路長とすると、 $\theta(x)$  が微小であることから、以下の関係式が成り立つ。

$$d\ell_i = 2L(x_i)\theta(x_i)$$

以上の式から  $d\ell$  は次式で表される。

$$d\ell = dx + 2 \cdot L(x) \cdot \{\theta(x) - \theta(x+dx)\} \quad (2)$$

もとより、今のところ  $L(x)$  は定数であり、以後  $L$  と表記する。

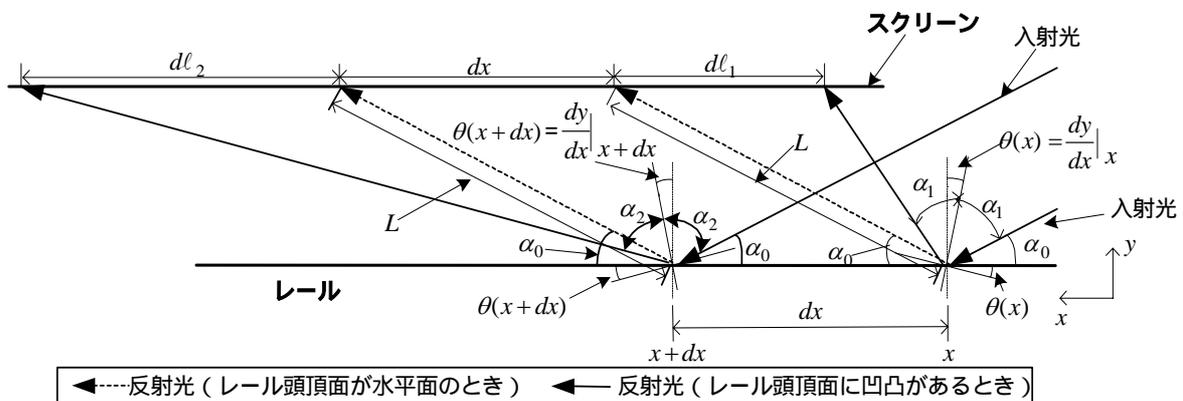


図-1 波状摩耗測定原理

したがって、スクリーン上での光の強さを  $P(\ell)$  とすると、これは次式で表される。

$$\begin{aligned}
 P(\ell) &= E \cdot \gamma \cdot \frac{dx}{d\ell} \\
 &= E \cdot \gamma \cdot \frac{dx}{dx + 2 \cdot L \cdot \left( \frac{dy}{dx} \Big|_x - \frac{dy}{dx} \Big|_{x+dx} \right)} \\
 &= E \cdot \gamma \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot L \cdot \frac{d^2y}{dx^2}} \quad (3)
 \end{aligned}$$

式(3)より、 $\frac{d^2y}{dx^2}$  は次式で表すことができる。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \left( \frac{E \cdot \gamma}{P(\ell)} - 1 \right) \quad (4)$$

以上より、 $P(\ell)$  を測定して(4)式に代入し、二回積分することにより波状磨耗の形状を算出することができる。ここで、測定装置のミスアライメントは  $L(x)$  に生じるが、どのみち  $L$  そのものの値比べてミスアライメントは小さく、その影響は敏感ではない。これは、変位探知位置をメカニカルに変化させようとする従来の装置が、測定値そのものと同じオーダーのミスアライメントを強いられることと比べて大きな利点である。

レールの変位  $y(x)$  は、次式で表される。

$$y(x) = \iint \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \left( \frac{E \cdot \gamma}{P(\ell)} - 1 \right) dx \quad (5)$$

式(5)の数値積分は、普通に行えばドリフトの影響を避けられないが、波状磨耗の測定は直流成分を興味の対象としないことを利用すれば、フーリエ変換を利用してドリフトを避ける積分が可能である。

### 3. 昨年の波状磨耗測定実験と新しい取組<sup>1)</sup>

波状磨耗の測定には、少なくとも数波長以上の測定範囲を有することが望ましい。いま、波長 10cm 程度を対象として、測定範囲を 500mm 程度とする。本研究で使用するレーザーの投光幅は 42mm で、測定範囲を 500mm とすると、きわめて浅い角度で照射することになる。これは、光パワーメータのセンサーにも、ほぼ同じ浅い角度で光が照射されることを意味する。センサー受光面の周囲には高さ 1mm の縁があり、浅い角度でセンサーに入射する光は測定できない。このため、昨年の研究では、スクリーンをレールに対して平行ではなく斜めに設置して測定を行った。その結果、スクリーンの端部のレールにごく接近した部分で、スクリーンでいったん反射した光がレールを照射し、再び反射してスクリーンに達するという、いわゆる多重反射が観測された。そのため、この区間を除外することとなった。今回はセンサーの縁を削ることにより、スクリーンを斜めに設置することなく測定できるようになり、多重反射の影響を受けることなく測定することができるようになった。

また、昨年の研究において、提案した方法ではきわめて精密な測定装置を作製する必要性に乏しいことから、極力簡易な装置を試作・使用したために、結果的には装置のミスアライメントの影響を被ることになった。波状磨耗は波長が短いものと、比較的長いものとが重なって

現れる。しかし、測定結果が、長波長の波状磨耗であるか、スクリーンのたわみのせいであるかが判定できなかった。それを防ぐために、より製作精度の高い装置を製作した。さらに、測定時間や測定に費やす労力を極力少なくするため、容易にしっかりと設置可能になるように工夫した。

### 4. 今後の展望

ただ今、この新しく製作した装置による測定実験の最中である。詳細は当日発表する。参考に昨年の測定結果を下に示す(図 - 2, 3, 4)。

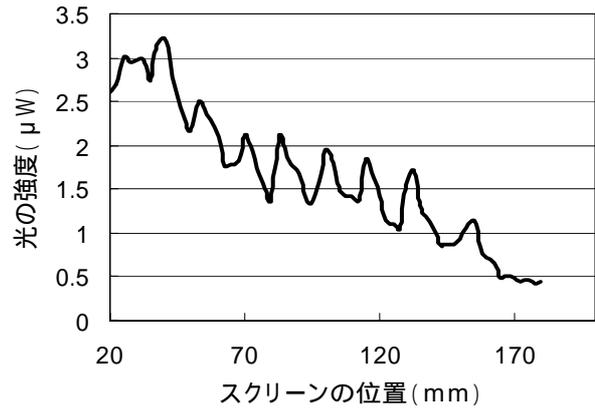


図 - 2 測定結果

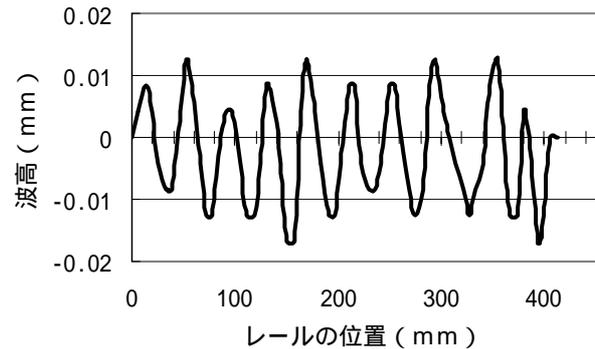


図 - 3 計算結果

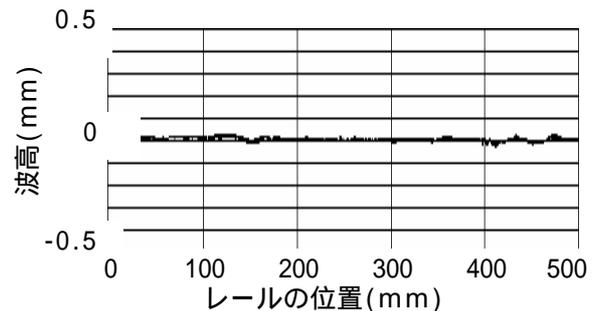


図 - 4 従来の方法による測定結果

### 参考文献

- 1) 河瀬 庸平・壇 和喜・角 知憲：「レール波状磨耗の光学的測定の試み」 第 8 回鉄道力学シンポジウム講演論文集 Vol.8, 2004.7
- 2) 佐藤 吉彦：「新軌道力学」 株式会社鉄道現業者, 1997
- 3) 宮本 俊充・渡辺 偕年：「線路 - 軌道の設計・管理 - 」 株式会社山海堂, pp363, 1982