

1. まえがき

本研究は、軌道歪みのパワースペクトル推定におけるデータの読取り誤差の影響について検討し、通常の軌道歪み検測記録からパワースペクトルを推定する場合に有効な軌道歪み波長範囲を明らかにしたものである。

軌道歪みの検測記録からパワースペクトルを求めようとする場合、現行では次の事項に留意する必要がある。

- (1) 車両走行によって重要な影響をもつ高低歪みおよび通り歪みは、一定の基準座標からの変位を示すもの(絶対歪み)ではなく、軌道上の3英の変位から相対的に定められるもの(相対歪み)であること
- (2) 軌道歪みのアナログ記録を人が読取ってデジタル化を行う場合、ある程度の大きさの読取り誤差が混入すること

パワースペクトルと軌道歪み状態表示の一つの方法として導入する場合に、それは車両の動的挙動と直接的に物理的關係をもつ絶対歪みに対応するものであることが望ましい。相対歪みは絶対歪みに測定波長と軌道歪み波長により定まるフィルタリングを施したものであることより、相対歪みのパワースペクトル推定値と絶対歪みのものに修正することが基本的に可能であるが、この修正は、本来無関係な読取り誤差にも施されることとなり、検討を要する由顕著となる。

2. 理論的考察

相対歪みと絶対歪みとの関係は次式で示される。

$$y(t) = x(t) - \frac{1}{2} \{x(t-l) + x(t+l)\} \quad (1)$$

こゝに $y(t)$: t 英における相対歪み, $x(t)$: t 英における絶対歪み, l : 測定波長 $L \times 1/2$

(1) 式のような総形結合式に於いては次式が成立する。

$$G_y(f) = c^2(f) \cdot G_x(f) \quad (2)$$

こゝに $G_y(f)$: $y(t)$ のパワースペクトル
 $G_x(f)$: $x(t)$ のパワースペクトル
 $c(f) = 1 - \cos(2\pi f l)$, f : 周波数

したがって、相対歪みの測定記録より $G_y(f)$ を求め、

$$G_x(f) = G_y(f) / c^2(f) \quad (3)$$

によって絶対歪みに対応する $G_x(f)$ が得られることになる。(3) 式の操作をフィルタ補正と呼ぶ。

次に、 $y(t)$ に読取り誤差 $e(t)$ が付加された場合も考える。読取り値より得られるパワースペクトル $G_y(f)$ は $e(t)$ のパワースペクトル $G_e(f)$ と併せて $G_y(f) = G_y(f) + G_e(f)$ となり、これをフィルタ補正を施すと、

$$G_y(f) / c^2(f) + G_e(f) / c^2(f) = G_x(f) + G_e(f) / c^2(f) \quad (4)$$

が得られることになる。これは真の値よりも才2項だけ大きい。 $c(f)$ は図1に見られるように f に応じて $0 \sim 2$ の間で変動する値であり、(4) 式では才2項がきわめて大きくなることもある。

パワースペクトル推定における標本変動を評価するパラメータとして、一般に標準偏差

$$\varepsilon = \sigma[\hat{G}(f)] / G(f)$$

こゝに $\sigma[\hat{G}(f)]$: 推定値 $\hat{G}(f)$ の標本変動の標準偏差

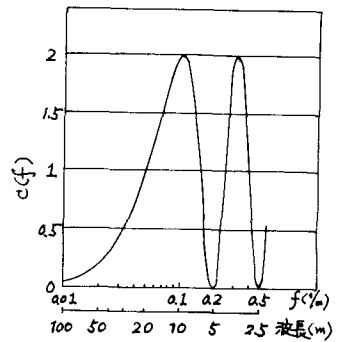


図1 $c(f)$ の特性

が用いられる。絶対狂いのパワースペクトルの推定を(4)式による場合、推定の偏より無視すると

$$\sigma^2[\hat{G}(f)] = \sigma^2[\hat{G}_x(f)] + \sigma^2[\hat{G}_e(f)] / c^2(f)$$

ここは $\hat{G}_x(f)$: $G_x(f)$ の推定値, $\hat{G}_e(f)$: $G_e(f)$ の推定値

であり、パワースペクトル推定の自由度 n のとき $\sigma[\hat{G}(f)]/G(f) = \sqrt{2/n}$ であることを用いると、この場合の標準誤差として

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sigma[\hat{G}_x(f)]}{G_x(f)} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{c^2(f)} \frac{G_e(f)}{G_x(f)} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

が得られる。上式中 $\sigma[\hat{G}_x(f)]/G_x(f)$ は読取り誤差のない場合の本래の標準誤差で、これを $\bar{\epsilon}$ と書くこととすると、 $\{ \}$ 内のオ 2 項が 1 に比べて小さい場合、上式は

$$\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c^2(f)} \frac{G_e(f)}{G_x(f)} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

となり、読取り誤差の存在によって $\{ \}$ 内のオ 2 項だけ標準誤差が増加することが示される。

(6) 式はフィルタ補正を行なう場合の推定精度評価に用いることができる。つまり、推定精度と標準誤差の増分を一定比率 α 以下に保つこととすれば、(6) 式より

$$G_x(f) \geq G_e(f) / (2 \cdot \alpha^2 c^2(f)) \quad (7)$$

が得られ、(7) 式を満足する f で所要精度をもってフィルタ補正の方法が有効であることが知られる。

3. 数値的検討

$G_e(f)$ の数値を明らかにすることは始める。誤差 $e(t)$ は各バッチに独立であるから $G_e(f)$ は一定値をとり、その値は $e(t)$ の分散 σ_e^2 に等しい。図 2 は水準狂いのパワースペクトルを求めた結果 (500 m 区間より 1 m ごとに標本抽出, FFT 法, Hanning 補正) を示したもので、この図で約 0.35 μ m 以上の周波数領域でそれまでの減少傾向が明らかでなくなっている。水準狂いは高値狂いなどのような例定法によるフィルタの影響を受けないことはなく、上述の周波数領域では σ_e^2 が $G_x(f)$ より卓越し、 σ_e^2 の標本変動が現れているものと見られる。多くの標本区間にわたって調べた結果では、 σ_e^2 の平均値として 0.15 ~ 0.45 という数値が得られた。

次に、前章の前節より推定が有効な軌道狂いの波長範囲を定める。 σ_e^2 の値は読取りの条件によって変わるもので、大きめに 0.5 とし、 $\alpha = 0.1$ として (7) 式を用いると

$$G_x(f) \geq 1.119 / c^2(f) \quad (8)$$

が得られる。前述により、(8) 式は読取り誤差による標準誤差の増分を 10% 許容したときのフィルタ補正による絶対狂いのパワースペクトル推定に有効な波長ごとのパワースペクトルの大きさを示す。図 3 は高値狂いについて相対狂いのパワースペクトルを計算し (標本抽出は図 2 に同じ, FFT 法, 標本平均補正), フィルタ補正を行なった結果を示す。図中破線は (8) 式の符号の場合の $G_x(f)$ を示し、実際の $G_x(f)$ の値がこれより上にある許容条件を満足する。図 3 によれば、約 0.15 μ m 以下の周波数領域をもち約 7 m 以上の波長範囲が条件を満足する。従来のように車両の動的挙動との関連が問題とされる軌道狂いの波長は 10 ~ 40 m であるが、上記の結果から、フィルタ補正法は実用として十分に使用し得るものと考えられる。ここでは高値狂いについて示したが、通り狂いについても同様であることが確かめられている。

本研究は国鉄技研よりの委託研究の一部であることを付記する。

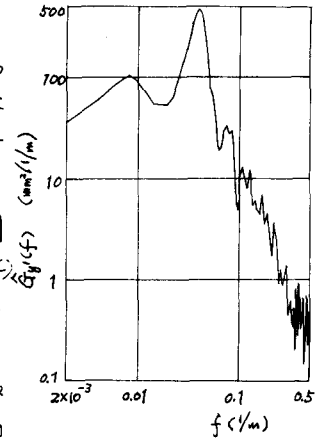


図 2 水準狂いのパワースペクトル例

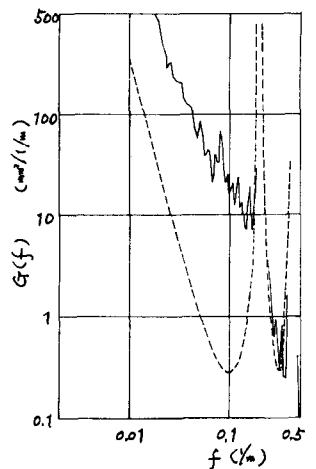


図 3 高値狂いのパワースペクトル例