乗り心地管理のための振動解析システムの開発*

(第1報, 振動解析システムの概要)

谷 藤 克 也**

The Development of Car-Vibration Analyzing System for Maintenance of Riding Quality

(1st Report, Outline of the Vibration Analyzing System)

by Katsuya TANIFUJI

A car-vibration analyzing system was developed for the maintenance of the riding quality of railway vehicles. This system, composed of a 16 channel FFT signal processor and a thermal printer, has a software program which evaluates car-vibration and riding quality. And it can process simultaneously 8 lateral vibration channels and 8 vertical vibration ones at maximum. The principal evaluation index is the Riding Quality Level L_r which is a newly proposed index fundamentally based on ISO Standard 2631. L_r is calculated from the power spectrum density of car-body acceleration analyzed by the FFT signal processor. The output data are divided into the following 3 groups and are displayed on a CRT. (1) Data for judging riding quality (2) Data for indicating improvement in performance (3) Data for predicting transition of vibration and riding quality in increase of running distance.

Key Words: Railway, Vibration, Data Processor, Riding Quality Level, ISO Standard 2631, Power Spectrum Density

1. ま え が き

営業列車の快適な振動乗り心地を維持するため、新幹線では車両の走行管理が行われている。すなわち、乗り心地管理のためには、走行状態における車両振動の動的チェックが必要である。そこでは、定期的な振動測定により、個々の車両の振動性能が調べられ、その結果が車両検修へ反映される。このような車両走行管理を合理的に実施するためには、多量のデータ解析を速やかに実行し、検修へフィードバックしなければならない。従来、走行管理のための振動測定では機械式振動計が使われてきたが、記録紙上の振動波形解析は人手作業と経験に依存して行われてきた。昭和57年に開業した東北新幹線の車両走行管理では、機械式に代わり、電氣的に振動を測定したデータレコーダに収録する方法⁽¹⁾が採用されることになった。そこで、新しい乗り心地評価法の提案⁽²⁾とあいまって、解析装置を利用した車両振動の自動処理化を図った。これにより、乗り心地と走行安定性の改善につながる車両因子を迅速、かつ客観的に把握することが可能になった。

本論文では、車両保守を担当する現業機関による活用を前提に開発した、鉄道車両走行管理のための簡易な装置による乗り心地解析システムについて報告する。

2. 車両振動および乗り心地の評価量

乗り心地管理の面から車両振動とその乗り心地を判定するための評価量として、以下の諸量を用いた。

2.1 パワースペクトル密度 p_{xx} パワースペクトル密度 (PSD と表す) p_{xx} は次式で表され、車体振動加速度データの周波数分析により得られる⁽³⁾。

$$p_{xx}(f) = 2 \cdot |X(f)|^2 / T \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $X_T(f)$ は次式のように定義される時系列データ $X_T(t)$ のフーリエ変換である。

$$X_T(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x_T(t) \exp(-j \cdot 2\pi f t) dt \cdots \cdots (2)$$

$$x_T(t) = \begin{cases} x(t) & ; |t| \leq T/2 \\ 0 & ; |t| > T/2 \end{cases} \cdots \cdots (3)$$

PSD 計算のためのフーリエ変換には、FFT (高速フーリエ変換) のアルゴリズム⁽⁴⁾を用い、データウィンドを Hanning としている。本解析手法では、この PSD を各種評価量算出のための基礎データとしている。なお、PSD の分析にあたっては、周波数分解能 Δf を

* 昭和61年6月21日 東北支部秋田地方講演会において講演、原稿受付 昭和60年8月12日。

** 正員、鉄道技術研究所 (〒185 国分寺市光町2-8-38)。

0.1 Hz とするために、分析1回あたりの時系列データ取り込み時間を、 $T=10$ s としている。また、分析する最高周波数 $f_{\max}$ を 50 Hz とした。したがって、必要なサンプリング周期 Δt はサンプリング定理の関係から、

$$f_{\max} < 1/(2 \cdot \Delta t) \dots \dots \dots (4)$$

となり、 $\Delta t < 0.01$ s であることが要求される。

2.2 rms (root mean square) 値 rms 値 x_{rms} とは実効値のことを言い、振動の強さを表すのに合理的な量である。

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T_E - T_B} \int_{T_B}^{T_E} x^2(t) dt} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 T_B と T_E は評価する振動波形の始点と終点の時刻である。rms 値にはオクターブバンド(帯域別) rms 値と分析振動数範囲全域のオーバーオール rms 値とがあり、PSD $p_{xx}(f)$ を振動数 f で積分することによっても算出できる。すなわち、PSD とオクターブバンド rms 値の間には次の関係がある。

$$x_{\text{rms}i}^2 = \sum_{f=f_{li}}^{f_{ui}} [p_{xx}(f) \cdot \Delta f] \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $(x_{\text{rms}})_i$ [$(a_{\text{rms}})_i$ とも表す] は i 番めの帯域の rms 値を表しており、 f_{li} は同帯域の下限振動数、 f_{ui} は同帯域の上限振動数である。オクターブバンドによ

る振動数帯の分割は、 $\Delta f = 0.1$ Hz の場合、表1に示すとおりである。なお、表1中の記号 f_{ci} は i 番めの帯域の中心振動数を表しており、*印をつけた値はオクターブで規定される振動数の上限値または下限値とは異なる値になっている。

2.3 乗り心地レベル L_T ⁽²⁾ 乗り心地の判定には新しい評価量として提案され、国鉄で適用される機会が多くなっている乗り心地レベル L_T を採用した。 L_T は次式で定義されるように、人体の振動感覚により重み付けされた振動波形のオーバーオール rms 値(実効値)から求められる。

$$L_T = 20 \log_{10} (a_w / a_{\text{ref}}) \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 a_w は人体の振動感覚特性により重み付けされた車体振動加速度実効値、 a_{ref} はいき値であり 10^{-5} m/s² である。この重み付け実効値は、原波形から分析されたパワースペクトル密度 p_{xx} を振動感覚特性で補正して求めた rms 値と等価であるので、式(7)は次のように表すことができる。

$$L_T = 10 \log_{10} \left[\sum_{f=0.5}^{50.0} p_{xx}(f) \cdot W^2(f) \cdot \Delta f / a_{\text{ref}}^2 \right] \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $W(f)$ は人体の振動感覚特性に基づく重み係数であり、図1に示すように、左右(水平)方向と上下方向で異なる特性を有している。この特性曲線は、ISO-2631⁽⁵⁾の振動に対する等感覚特性(1~80 Hz)に、低振動数側へ1 Hz から 0.5 Hz までは加えたものであり、乗り心地フィルタとも呼ばれる。

このように乗り心地レベルは、特定の振動数に片寄ることなく広い振動数帯にわたり、一つの数値で包括的に車両振動を評価することができる。すなわち、 L_T

表1 オクターブバンド振動数分割法

Band No.	Octave band		
	Center freq. f_{ci} (Hz)	Lower freq. f_{li} (Hz)	Upper freq. f_{ui} (Hz)
1	0.5	* 0.2	0.7
2	1	0.8	1.4
3	2	1.5	2.8
4	4	2.9	5.6
5	8	5.7	11.2
6	16	11.3	22.4
7	32	22.5	* 50.0

表2 乗り心地レベルと振動区分

Vibration division	Riding quality level L_T (dB)	(Evaluation)
①	$L_T < 83$	Excellent
②	$83 \leq L_T < 88$	Good
③	$88 \leq L_T < 93$	Fair
④	$93 \leq L_T < 98$	Poor
⑤	$98 \leq L_T$	Very poor

図1 乗り心地フィルタ

は基準の振幅 α_{ref} に対する α_w の倍率をデシベル (dB) 表現したものである。 L_T による車両振動の評価は、表 2 のように 5 段階になっており、中間の三つの段階は 5 dB ずつ区分されている。ちなみに、新幹線などの高速旅客列車では、 L_T は乗り心地の評価として“良い”に相当する振動区分②の範囲の数値以下であることが望ましいとされる。

2.4 振動数成分寄与率 $\zeta_i^{(2)}$ 人体の感覚特性で補正された振動加速度のパワーについて、オクターブバンドごとの全パワーに占める割合を振動数成分寄与率といい、乗り心地に対して影響の大きい振動数を論

ずるのに便利な量である。 i 番めのオクターブバンドの振動数成分寄与率 ζ_i は、次式により計算される。

$$\zeta_i = \frac{\sum_{f=f_{li}}^{f_{hi}} [p_{xx}(f) \cdot W^2(f) \cdot \Delta f]}{\sum_{f=0.5}^{50.0} [p_{xx}(f) \cdot W^2(f) \cdot \Delta f]} \quad \dots\dots\dots (9)$$

3. システムの機器構成と処理プログラム

3.1 システムの機器構成と機能 乗り心地管理のために開発した振動解析システムの機器構成ブロック図を図 2 に示す。図示されるように、市販の FFT (高速フーリエ変換) シグナルプロセッサとプリンタとから構成される。解析処理はいったん収録されたデータを対象に実行される。

シグナルプロセッサは、車体振動加速度のアナログ量データを最大 16 チャンネル (左右振動・上下振動各 8 チャンネル) まで同時に取り込んでデジタル値に変換し、FFT によりパワースペクトル密度 (PSD) を分析することができる。ちなみに、東北新幹線の車両走行管理では、同時に 8 両分の左右および上下振動 16 チャンネル分のデータを FM 搬送波で多重化して、カセット式データレコーダで収録している。

分析された PSD を使って、乗り心地解析プログラムによる各種振動評価量の演算処理が実行される。処理結果はブラウン管に画面表示され、必要なデータは

図 2 システムの機器構成

図 3 演算処理の流れ

フロッピーディスクに格納することができる。プリンタはブラウン管の表示画面をハードコピーとして、そのまま印刷するものである。

3.2 処理プログラム 図3に振動解析のための演算処理の流れを示す。処理の流れは二つに大別され、その一つはデータの取り込みから始めて入力単位ごとに処理結果を求めるもので、図3の太い線で示す流れである。もう一つの流れは、既に解析されてフロッピーディスクに格納されたデータファイルを用いて処理を進めるもので、図3では細い線で示されている。すなわち、走行距離に対する振動性能の履歴、長距離走行区間における L_T の分布を把握するためには、いったん解析したデータを補助記憶装置に保存し、必要の都度、読み出しが行われる。このデータファイルには、次の3種のファイルがある。

(1) 編成ファイル 車両編成ごとに作成されるファイルで、編成全車両の処理データを15回(処理)まで格納できる。

(2) L_T ファイル 長距離区間(例えば、一線区全線)を駅間とか10 km ごとに小区間に分割して解析された乗り心地レベル L_T が蓄積される。

(3) FFT ファイル 「16チャンネルFFT演算」処理ごとに作成される一時的なファイルである。

次に、処理結果の出力には合計9種類の表示画面があり、利用目的により次の3項目に大別される。

- (1) 乗り心地の良否を判定するための出力
 - (i) チャンネルごとの p_{xx} と L_T
 - (ii) 左右振動 p_{xx} の8チャンネル同時表示
 - (iii) 上下振動 p_{xx} の8チャンネル同時表示
 - (iv) 長距離区間の L_T ヒストグラム
- (2) 振動性能改善上の指針を引き出すための出力
 - (i) 各車両の左右・上下振動 $(a_{rms})_i$ の表
 - (ii) $(a_{rms})_i$ の8車両間比較グラフ
 - (iii) L_T と ξ_i の8車両間比較グラフ
- (3) 走行距離の増加による振動と乗り心地の変化を予測するための出力
 - (i) 走行距離に対する $(a_{rms})_i$ のグラフ
 - (ii) 走行距離に対する L_T と ξ_i のグラフ

出力表示の一例として、上記画面項目のなかでも最も

図4 出力例「チャンネルごとの p_{xx} と L_T 」

基礎的なデータである「チャンネルごとの p_{xx} と L_T 」を図4に示す。

4. ま と め

簡易な装置を利用した車両振動と乗り心地の解析システムを開発した。本システムは車両走行管理を担当する現業機関が使用することを前提に開発したものであり、今後の活用が期待される。ここでは、第1報として、本振動解析システムの概要を述べた。続けて、東北新幹線で約1 y にわたり実施された240 km/h 長期耐久試験で測定した振動データの解析から、システムの実用例を第2報として報告する予定である。

終わりにあたり、本報のとりまとめに関して懇切なご指導を賜った東北大学高速力学研究所 畑中浩教授に感謝の意を表する。また、本研究を進めるに当たっては、岐阜工業高等専門学校 三芳功達教授(前 鉄道技術研究所・車両運動研究室長)から多くの有益なご助言を頂いた。ここに記して厚く御礼を申し上げる。

文 献

- (1) 鈴木, 鉄道技術研究資料, 40-3 (昭58), 113.
- (2) 三芳, 鉄道技術研究資料, 38-3 (昭56), 127.
- (3) 谷口, 振動工学ハンドブック, (昭51), 688, 養賢堂.
- (4) 大崎, 地震動のスペクトル解析入門, (昭51), 82, 鹿島出版会.
- (5) ISO, ISO 2631-1978 (E), (1978), 1.