

トラクタの振動源としてのほ場面プロフィルの シミレーション

笹尾 彰・遠藤 俊三
(農業機械学研究室)

Received November 1, 1975

Simulation of Field Profiles as Sources of Tractor Vibrations

Akira SASAO, Shunzo ENDO
(Laboratory of Agricultural Machinery)

As a series of studies of ride comfort on a tractor from vibrations point of view, this paper discussed the methods to calculate the profiles of field surface where power spectral density (P. S. D) was given and studied the propriety of calculated profiles for analysis of tractor dynamics by digital computer simulation.

The results are summarized as follows.

- 1) The profiles were calculated by two methods, that is, the moving average filter method (MA-filter), and the autoregression filter method (AR-filter). By either method, a good result was obtained in case of $k=25\sim30$ (k : the number of sample of P. S. D). And the MA-filter method gave a better result than AR-filter.
- 2) We used the simulated profiles as input data of dynamic model of tractor and calculated vertical acceleration of the center of gravity (C. G) and seat of tractor by digital simulation. In each case a fairly good agreement was obtained between experimental results and calculated results.

緒 言

トラクタ走行時のオペレータの振動に対する応答特性について、すでにその共振周波数が $3\sim10\text{ Hz}$ の低周波域にあることを明らかにした¹⁾。このような周波数域の発生主要因としては、走行路面の凹凸が考えられる。ほ場機械の乗心地問題の検討には、走行路面となるほ場面凹凸の特性を解明することが重要であり、すでにいくらかの報告がみられる²⁾。それらを実測のプロフィルから計算されたパワースペクトル密度(以後 P. S. D と略記する)によって特性を表示し、ほ場面の分類がなされている。本論文では、不整地走行時の挙動解析のための実験ほ場の設計や、デジタルシミレーションへの入力としての、ほ場面のプロフィルを、与えられた P. S. D から求める方法を述べ、さらに得られ数値プロフィルをデジタルシミレーションによるトラクタの挙動解析に適用した場合の適応性を検討した。

ほ場面プロフィルのシミレーション

1. 移動平均型フィルタの利用

あるフィルタ特性 $A(f)$ をもった線形な系を考える。 $A(f)$ の Fourier 逆変換を $h(t)$ とすると次式が成り立つ。

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(f) \exp(i \cdot 2\pi f \cdot t) df \quad (1)$$

ここに f は周波数, $i^2 = -1$

この系への入力関数 $w(t)$, 出力関数 $x(t)$ とすると入出力間には次式の関係が成り立つ.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau) h(t-\tau) d\tau = \int_0^{\infty} h(\tau) w(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

入力 $w(t)$ の P. S. D を $S_w(f)$, 出力 $x(t)$ の P. S. D を $S_x(f)$ とすると

$$S_x(f) = |A(f)|^2 \cdot S_w(f) \quad (3)$$

となる. ここで与えられた P. S. D を $S(f)$ として,

$$|A(f)|^2 = S(f) \quad (4)$$

を満足する $A(f)$ を決定し

$$S_w(f) = 1 \quad (5)$$

を満足する入力 $w(t)$ を与えれば, $S_x(f) = S(f)$ を満足する関数 $x(t)$ を (2) 式より得ることができる. (5) 式を満足する平坦なスペクトルをもつ関数 $w(t)$ は, その自己相関関数 $R_w(t)$ が次式を満足するようなホワイトノイズである.

$$R_w(t) = \delta(t) = \begin{cases} 1 & (t=0) \\ 0 & (t \neq 0) \end{cases} \quad (6)$$

なお, 求める時系列を間隔 Δt のサンプル関数として考えるとき, (1) 式より, フィルタ特性 $A(t)$ をもつ数値フィルタ係数 $h(s \cdot \Delta t)$ ($s=0, 1, 2, \dots, n$) は次式になる.

$$h(s \cdot \Delta t) = \int_{-\frac{1}{2\Delta t}}^{\frac{1}{2\Delta t}} A(f) \cdot \exp(i \cdot 2\pi f \cdot s \cdot \Delta t) df \quad (2)'$$

ここで $A(f)$ は全く遅れのない $A(f) = A(-f)$ としてもさしつかえない³⁾ から, 次式になる.

$$h(s \cdot \Delta t) = 2 \int_0^{\frac{1}{2\Delta t}} |A(f)| \cdot \cos(2\pi f \cdot s \cdot \Delta t) df \quad (2)''$$

以上の関係を利用して, 与えられた P. S. D から (4) 式に従って, フィルタ特性 $A(f)$ をサンプル値関数 $A\left(\frac{r}{k} \cdot \frac{1}{2\Delta t}\right)$ ($r=0, 1, 2, \dots, k$) として求め n 個の $h(s \cdot \Delta t)$ を次式より得る.

$$h(s \cdot \Delta t) = 2 \sum_{r=0}^k \left| A\left(\frac{r}{k} \cdot \frac{1}{2\Delta t}\right) \right| \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{r}{k} \cdot \frac{s}{2}\right) \cdot \frac{1}{4t} \quad (2)'''$$

一方 (6) 式を満足するホワイトノイズとして標準偏差 1, 平均値 0 の正規擬示乱数列 $\{y_i\}$ ($i=1, 2, \dots, N$) を発生させる.

$$x_i = \sum_{s=0}^n h(s \cdot \Delta t) \cdot y_{i-s} \quad (7)$$

で求めた数列 $\{x_i\}$ ($i=1, 2, \dots, N$) がほ場面プロファイルの座標である.

2. 自己回帰型フィルタの利用⁴⁾

平均値 0 の離散的な時系列 $x(s \cdot \Delta t)$ ($s=1, 2, \dots, N$) について, $x(s)$ (以後 $\Delta t=1$ とする) の値をそれ自身の過去の値から予測する場合に

$$\varepsilon(s) = x(s) - \sum_{m=1}^M a(m)x(s-m) \quad (8)$$

の二乗平均値は

$$\begin{aligned}\overline{\varepsilon^2}(s) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \cdot \sum_{s=1}^N \varepsilon^2(s) \\ &= R_{xx}(0) - 2 \sum_{m=1}^M a(m) \cdot R_{xx}(m) + \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M a(l) \cdot a(m) \cdot R_{xx}(m-l)\end{aligned}\quad (9)$$

ここに R_{xx} は $x(s)$ の自己相関関数

となる。

$\overline{\varepsilon^2}(s)$ を最小にする最適予測フィルタ (以後、自己回帰係数と称す) $a_M(1), \dots, a_M(M)$ は $R_{xx}(0) \dots R_{xx}(M)$ が与えられれば (9) 式より得ることができる。自己回帰係数 $a_M(m)$ を与えると、充分大きな M に対して、 $\varepsilon(s)$ は分散 σ^2 をもつホワイトノイズとなる。すなわち $\varepsilon(s)$ の自己相関関数 $R_{\varepsilon\varepsilon}(m)$ および P. S. D $S_{\varepsilon\varepsilon}(g)$ ($-\frac{1}{2} \leq g = f \cdot \Delta t \leq \frac{1}{2}$) は

$$\begin{aligned}R_{\varepsilon\varepsilon}(m) &= \delta(m) \cdot \sigma^2 = \begin{cases} \sigma^2 & m=0 \\ 0 & m \neq 0 \end{cases} \\ S_{\varepsilon\varepsilon}(g) &= \sigma^2\end{aligned}\quad (10)$$

となり、 $a(0) = -1$ とおくと (8) 式より

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(l) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M a(m) \cdot a(n) \cdot R_{xx}(l-m+n)\quad (11)$$

が得られ、自己回帰係数 $a_M(m)$ が決まれば、 $\sigma^2 = R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$ が決定できる。

一方 (8) 式より得られる自己回帰係数 $a_M(m)$ を用いて、予測を行う場合の誤差を示す量の推定値 $FPE(M)$ を求め、これを最小にするような M を自己回帰係数の次数として採用する。

計算手順を次に示すと。

- i) 与えられた P. S. D より、自己相関関数 $R_{xx}(l)$ ($l=0, 1, 2 \dots L$) を決定する。
- ii) 自己回帰係数の次数 M の決定および $a_M(m)$ ($m=1, 2, \dots, M$)、 $R_{\varepsilon\varepsilon}(0) = \sigma^2$ を決定する。
- iii) 平均値 0、分散 σ^2 の正規擬示乱数列 $\{y(s)\}$ を発する。
- iv) $x(s) = y(s) + \sum_{m=1}^M a_M(m) \cdot x(s-m)$ を計算する。

$x(s)$ ($s=1, 2, \dots, N$) がほ場面プロファイルの座標を与える。

3. 計算結果

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, に計算結果の一例を示す。Fig. 1 (a) は周期性の強いうねをもつ甘藷跡地を横切る時の実測データである。このデータから得られた P. S. D を Fig. 2 の実線に示す。

このシミュレーションの結果を、Fig. 1 (b), (c) に示す。さらにそれぞれの P. S. D を Fig. 2 に同時に示す。Fig. 3 は文献 (2) で Plowed field のクラスに分類された $S(F) = F^{-0.38}$ で近似できるほ場についての結果から、P. S. D を求めたものである。図中、実線が与えられた P. S. D で破線は移動平均型フィルタを用いたもの、一点鎖線は自己回帰型フィルタを用いたものである。Fig. 1, 2 については、与えられたサンプル数 $k=25$ とし、数値フィルタ係数の項数 $n=25$ とした。自己回帰係数の次数 $M=8$ となった。Fig. 3 は $h=30$, $n=30$ とし、 $M=3$ を得て計算した結果である。Fig. 2 のようにある周波数成分のパワーが卓越している周期性の強いほ場、および Fig. 3 のように周波数の増加とともに、指数関

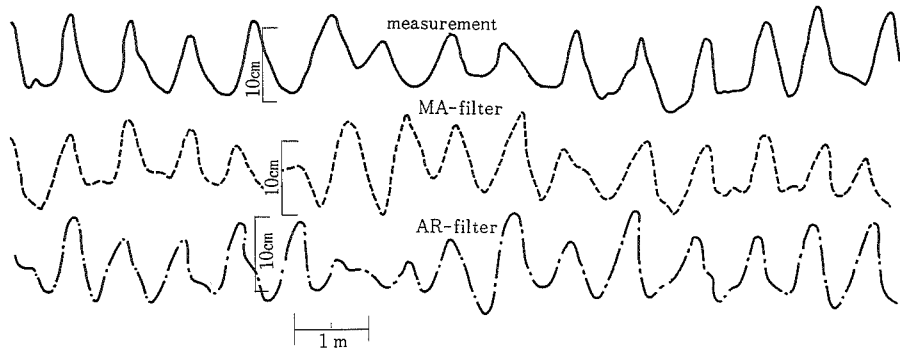


Fig. 1 Profiles of the measured and simulated field surface

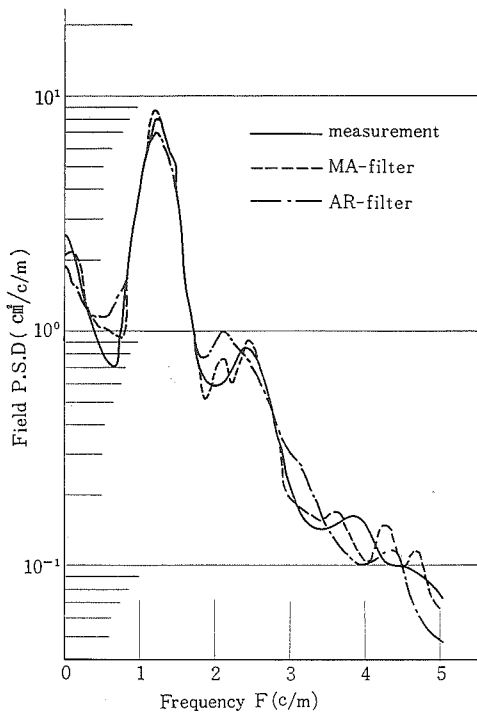


Fig. 2 P. S. D of field surface

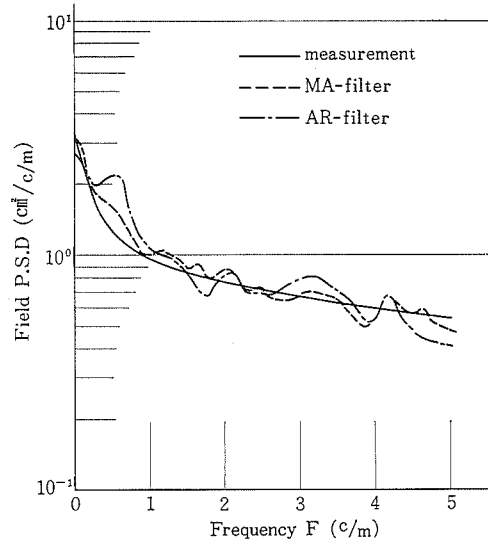


Fig. 3 P. S. D of field surface

数的に減少するような場合についても、項数25~30位でほぼ満足すべき結果が得られた。また移動平均型フィルタの方がよりよい結果が得られた。

トラクタの不整地走行時の挙動解析への適用

移動平均型フィルタを用いて得られた数値は場をすでにその妥当性を確かめたトラクタの振動モデル⁴⁾への入力として適用し、トラクタによる実験結果と比較して、その適応性を検討した。

1. 振動モデルと運動方程式

振動モデルは、Fig. 4 に示す。これは4車輪で弾性支持された多入力線形振動系で、力学的にも幾何学的にも左右対称であるものとする。ほ場面の凹凸 x_{11} , x_{12} , x_{21} , x_{22} を強制外力とするときの運動方程式は次式となる。記号は図中のものを用いる。

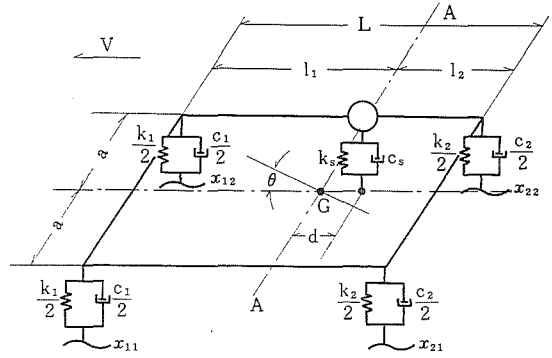


Fig. 4 Dynamic model of tractor

$$\left. \begin{aligned}
 &M_1 \ddot{z} + (c_1 + c_2 + c_s) \dot{z} + (k_1 + k_2 + k_s)z + (c_2 l_2 - c_1 l_1 + c_s d) \dot{\theta} \\
 &+ (k_2 l_2 - k_1 l_1 + k_s d) \theta - c_s \cdot \dot{z}_s - k_s z_s = \frac{1}{2} k_1 (x_{11} + x_{12}) + \frac{1}{2} k_2 (x_{21} + x_{22}) \\
 &+ \frac{1}{2} c_1 (\dot{x}_{11} + \dot{x}_{12}) + \frac{1}{2} c_2 (\dot{x}_{21} + \dot{x}_{22}) \\
 &M_s \ddot{z}_s + c_s (z_s - z - \dot{\theta} d) + k_s (z_s - z - \dot{\theta} \cdot d) = 0 \\
 &I \ddot{\theta} + (c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2 + c_s d^2) \dot{\theta} + (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 + k_s d^2) \cdot \theta + (c_2 l_2 - c_1 l_1 + c_s d) \dot{z} \\
 &+ (k_2 l_2 - k_1 l_1 + k_s d) z - c_s \cdot d \cdot \dot{z}_s - k_s \cdot d \cdot z_s = \frac{1}{2} c_2 l_2 (\dot{x}_{22} + \dot{x}_{21}) \\
 &- \frac{1}{2} c_1 l_1 (\dot{x}_{11} + \dot{x}_{12}) + \frac{1}{2} k_2 l_2 (x_{11} + x_{22}) - \frac{1}{2} k_1 l_1 (x_{11} + x_{12})
 \end{aligned} \right\} (12)$$

- ここに M_1 , M_s はトラクタおよびオペレータの質量
- I は A-A まわりの慣性モーメント
- z , z_s は重心およびシートの上下変位
- θ はピッチング角

ローリングは非連成となるので略す。

2. トラクタによる加速度の測定

供試トラクタ (FIAT 45 PS) が不整地ほ場面を一定速度 V (60~180cm/sec) で走行した時のトラクタの重心およびシートの上下方向加速度を測定し、20Hz ローパスフィルタを通過後の記録をスペクトル解析し、P. S. D を求めた。一方トラクタ走行時のほ場面のプロフィールをトランシット法により求め、その P. S. D を計算した。

3. 適応性の検討

振動モデルに対し、供試トラクタに相当する Table. 1 のモデル定数を与え、(12) 式の運動方程式を Runge-Kutta-Gill 法により解き、重心およびシートの上下方向加速度を求めた。なお入力の実測から得た P. S. D が与えられたときのシミュレーションにより得られた数値ほ場を用いた。計算に際しては、左右同時に同じ入力作用するものとし、後輪は前輪と同じ道を L/V の時間遅れで通過するものとした。

実験結果と計算結果の一例を Fig. 5 に示す。これは Fig. 2 の実線で示した P. S. D をもつ、甘藷跡地を $V=135\text{cm/sec}$ で走行した時の 重心およびシートの上下方向加速度の P. S. D をプロットしたものである。実線は実験結果、破線は計算結果である。両者を比較すると、ピーク値近辺で計算値の方がやや大きなパワーを示しているが、全般によい一致が得られた。以上のことから、P. S. D が与えられた種々のほ場について、もとのほ場プロフ

Table. 1 List of Standard Conditions

Physical Dimensions	(cm)	Damping Coefficients	(Kg·s/cm)
l_1	117.0	C_1	1.3
l_2	76.0	C_2	2.54
d	25.0	C_s	0.52
Mass	(Kg·s ² /cm)	Spring Rates	(Kg/cm)
M_1	1.52	k_1	152.0
M_s	0.0612	k_2	271.4
Inertia Moment	(Kg·cm·s ²)	k_s	19.72
I	11,000		

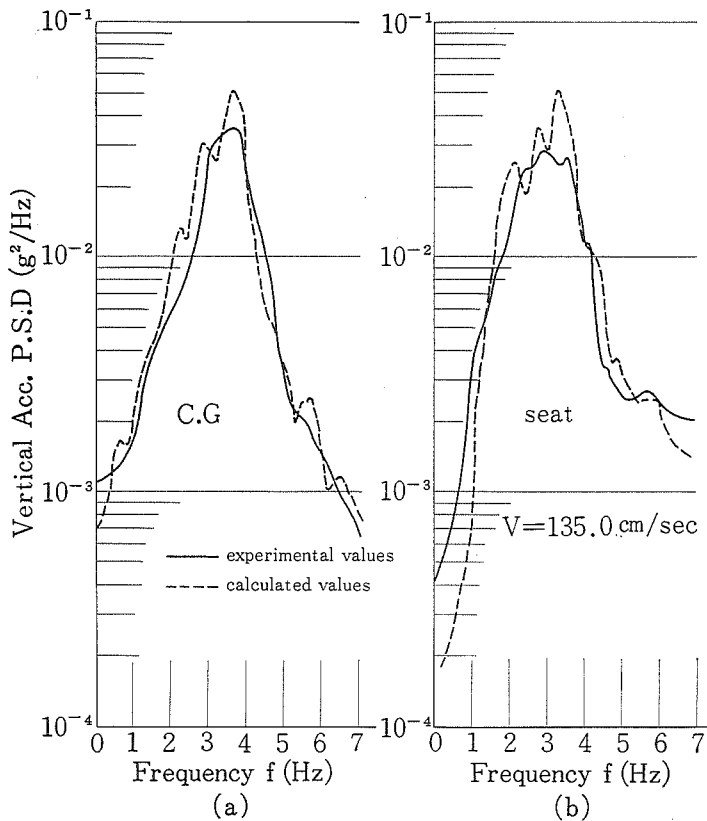


Fig. 5 P. S. D of vertical acceleration of C. G (a) and seat (b)

イルが計算でき、これは試験ほ場の設計の有効な資料になるとともに、本節でみたように、数値ほ場として、トラクタの振動モデルへの入力に用い、挙動解析や防振対策・シート設計等に有効な手段となりうるものとする。

摘 要

トラクタの乗心地問題を振動面からみた研究の一環として、走行中の主要な振動源である

ほ場面プロファイルを、与えられたパワースペクトル密度 (P. S. D) からもとめる方法を述べ、さらに得られた数値ほ場をトラクタの振動モデルへの入力としたときの、トラクタ走行時の挙動解析への適応性を検討し次のような結果を得た。

1) ほ場面プロファイルのシミュレーションは、発生した正規擬乱数に数値フィルタを作用させた。数値フィルタには、移動平均型フィルタと自己回帰型フィルタを用いた。両方法とも、与えられた P. S. D のサンプル数 25~30 で充分満足できる結果が得られた。両者を比較すると、移動平均型フィルタを用いる場合の方が計算手順も容易で、よりよい結果が得られた。

2) シミュレーションにより得られた数値ほ場を入力としてトラクタの挙動を重心およびシートの上方向加速度について検討したところ、実験結果とよい一致をみた。

以上のことから、ほ場面プロファイルのシミュレーションは、ほ場面の特性が与えられた P. S. D を有する試験ほ場の設計を可能にする一方本論文で適応性を検討したように数値ほ場としてデジタルシミュレーションによるトラクタ挙動の解析への入力に用い、防振対策やシート設計上の有効な手段となりうるものと考ええる。

なおこの研究の計算には、岡大計算機センターの計算機を使用した。

文 献

- 1) 遠藤俊三・西村功・笹尾彰：農業機械学会誌 **35**, 232—237 (1973)
- 2) WENDENBORN, J. G.: *J. Terramechanics*, **3**, 9—40 (1966)
- 3) 山川新二・角野巖：いゝず技報 (57), 49—56 (1972)
- 4) 赤池弘次・中川東一郎：ダイナミックスシステムの統計的解析と制御 (初版) 50—54, サイエンス社・東京 (1972)
- 5) 笹尾彰・遠藤俊三：農機学会講演前刷集 (33), 19 (1974)