

ロータリ耕トラクタの作業挙動

李 季¹・池見 隆男²・土居 栄城²

(¹ 愛媛大学大学院連合農学研究科施設生産学連合講座・² 農学部施設生産工学講座)

Behavior of a Tractor on Rotary Tilling

Ji Li¹, Takao IKEMI² and Eiki Doi²

¹ Major Chair of Plant and Animal Production under Structure,

The United Graduate School of Agricultural Sciences, Ehime University ;

² Chair of Biomechanical Systems, Faculty of Agriculture

Abstract : In this study, an attempt has been made to model the alternate load acting on the lower links for a rotary tilling tractor, according to the asymmetrical arrangement of tilling blades. This phenomenon has a great influence on the tractor-yawing. The dynamic model developed in this study showed a good agreement with the experimental data. It clearly indicates that the present model is adequate for practical use.

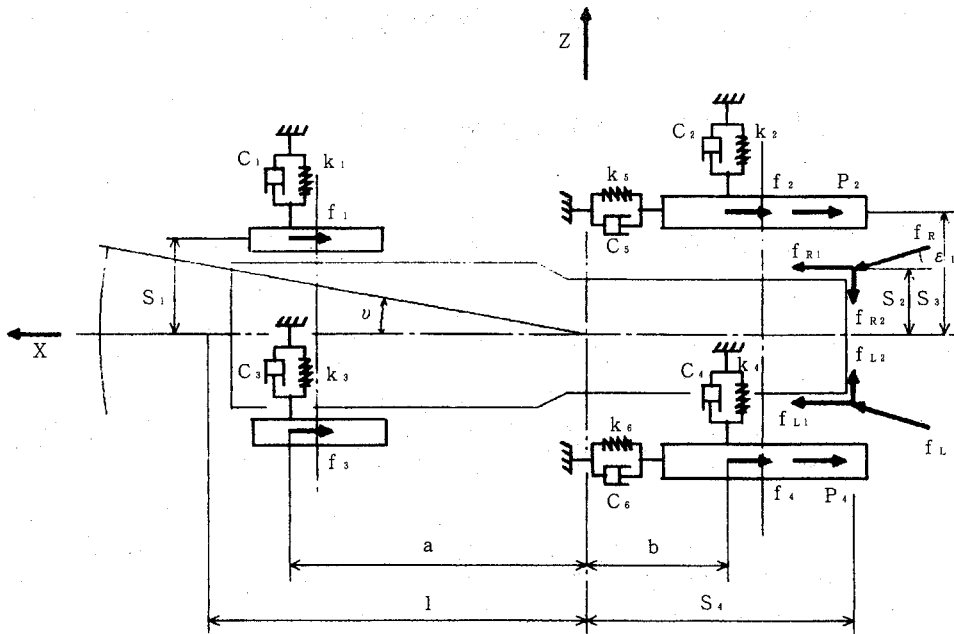
緒 言

農用トラクタは、耕うん作業中に複雑な振動を発生する。トラクタの振動は、上下、左右、前後方向の振動およびピッチ、ロール、ヨーの重心を通る慣性主軸回りの回転振動を含む。これらを合成した振動の原因は、搭載機関に起因するもの他、圃場面の凹凸、トラクタの車輪のラグや作業機械からの振動伝達によるものとされている。これについては多くの研究が行われてきた^{1,2)}。しかしながら、ロータリ耕の場合には、耕うん刃の配列を左右非対称にすることがよくあり、このため下部リンクに作用する力が左右交番状となって、これがトラクタのヨー振動を起こすもう一つの重要な原因となることが多いが、このことについて触れている研究は見当たらない。

トラクタは6自由度の振動を受けるが、ヨー運動に関しては自由度は2であり、垂直Y軸回りの回転および横Z軸方向の変位からなる。本研究は、ヨー運動について、理論的、実験的な検討を行ったものである。

トラクタのヨー運動

トラクタのヨー振動に関するトラクタの動的モデルは第1図のように示される。ただし、このモデルには圃場面の凹凸による影響を無視してある。



第1図 ヨー運動に関するロータリ耕トラクタの動的モデル

まず、トラクタのヨー振動を垂直Y軸回りの回転、横Z軸方向の変位に分けて検討する。

1. トラクタのY軸回りの回転運動

図1において、次の方程式が導かれる。

$$J_Y \frac{d^2 \nu}{dt^2} = \Sigma M_Y \quad (1)$$

ここに、 J_Y はトラクタのY軸に関する慣性モーメント、 M_Y は外力のトラクタのY軸に関するモーメント、 ν はトラクタのヨー方向の回転角である。(1)式の右辺のモーメントは次のように表される。

$$\begin{aligned} \Sigma M_Y = & F_L (s_2 \cos \varepsilon - s_4 \sin \varepsilon) + F_R (s_4 \sin \varepsilon - s_2 \cos \varepsilon) \\ & - a' \{k_1 (z + a' \nu) + c_1 (\dot{z} - a' \dot{\nu})\} \\ & + b' \{k_2 (z - b' \nu) + c_2 (\dot{z} - b' \dot{\nu})\} \\ & + s_3 \{k_3 (x - s_3 \nu) + c_3 (\dot{x} - s_3 \dot{\nu})\} \\ & - s_3 \{k_4 (x + s_3 \nu) + c_4 (\dot{x} + s_3 \dot{\nu})\} \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式を(1)式に代入して整理すると、次のようになる。

$$\ddot{\nu} = M_1 F_L + M_2 F_R - M_3 \dot{\nu} - M_4 \nu - M_5 \dot{z} - M_5 z \quad (3)$$

ここに、

$$\begin{aligned}
k_3 &\equiv k_4 \\
c_3 &\equiv c_4 \\
M_1 &= (s_2 \cos \varepsilon - s_4 \sin \varepsilon) / J_Y \\
M_2 &= (s_4 \sin \varepsilon - s_2 \cos \varepsilon) / J_Y \\
M_3 &= (a'^2 c_1^2 + b'^2 c_2 + 2s_3^2 c_3) / J_Y \\
M_4 &= (a'^2 k_1 + b'^2 k_2 + 2s_3^2 k_3) / J_Y \\
M_5 &= (a' c_1 - b' c_2) / J_Y \\
M_6 &= (a' k_1 - b' k_2) / J_Y
\end{aligned} \tag{4}$$

ここで,

x, \dot{x} : それぞれトラクタの進行方向の変位, 速度

z, \dot{z} : それぞれトラクタの横方向の変位, 速度

$\dot{\nu}$: ヨー方向角速度

F_L, F_R : それぞれ左右下部リンクの作用力

ε : 左右下部リンクの進行方向となす角

k_1, k_2 : それぞれ前後輪における土-タイヤ系の左右方向のバネ定数

c_1, c_2 : それぞれ前後輪における土-タイヤ系の左右方向の粘性抵抗係数

k_3, k_4 : それぞれ前後輪における土-タイヤ系の前後方向のバネ定数

c_3, c_4 : それぞれ前後輪における土-タイヤ系の前後方向の粘性抵抗係数

$a' = a + e_1$

$b' = b + e_2$

s_1, s_2, s_3, s_4 : それぞれ各作用力の作用点からトラクタの対称中心までの距離

2. トラクタのZ軸方向の変位運動

同様に, 第1図からZ軸方向の変位運動方程式が次のように求められる.

$$\begin{aligned}
m \ddot{z} &= F_L \sin \varepsilon - F_R \sin \varepsilon \\
&\quad - k_1 (z + a' \nu) - c_1 (\dot{z} - a' \dot{\nu}) \\
&\quad - k_2 (z - b' \nu) - c_2 (\dot{z} - b' \dot{\nu})
\end{aligned} \tag{5}$$

ここに, m はトラクタの質量, \ddot{z} はトラクタの横方向の加速度, (5)式の右辺は外力のトラクタの横方向に作用する力である. 上式を整理すれば, 次のように表される.

$$\ddot{z} = N_1 (F_L - F_R) - N_2 \dot{\nu} - N_3 \nu - N_4 \dot{z} - N_5 z \tag{6}$$

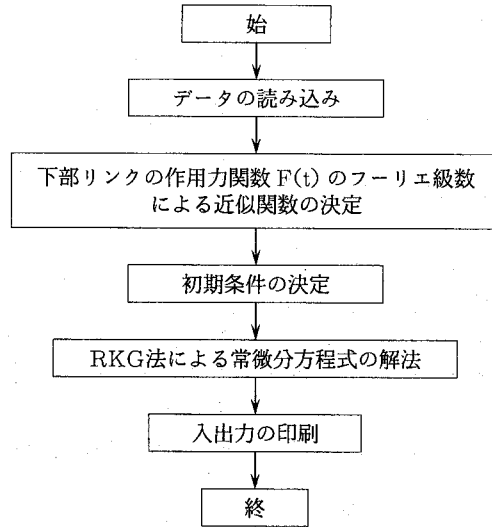
ここに,

$$\begin{aligned}
N_1 &= \sin \varepsilon / m \\
N_2 &= (a' c_1 - b' c_2) / m \\
N_3 &= (a' k_1 - b' k_2) / m \\
N_4 &= (c_1 + c_2) / m
\end{aligned} \tag{7}$$

$$N_s = (k_1 + k_2) / m$$

3. ヨー運動のシミュレーション

以上の動的モデルにおいて、運動のシミュレーションの手順を示せば第2図のようになる。



第2図 シミュレーションのフローチャート

モデルに対する入力は、次のような方法が考えられる。

(1)入力関数 シミュレーションで用いる入力関数は圃場で測定される下部リンク作用力 $F(t)$ の近似関数とする。入力関数 $F(t)$ の測定波形は、ほぼ一定のパターンの繰り返しであるから、フーリエ級数によって近似可能となる。入力関数 $F(t)$ は周期関数として工学的には有限項で近似する必要があるので、 $2n$ 個の項からなる $F'(t)$ で表すと次のようになる。

$$F'(t) = F_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos i\omega t + \sum_{i=1}^n b_i \sin i\omega t \quad (8)$$

ここでは、下部リンクにおける作用力の一例を次のように表すことにする。

$$F_L'(t) = F_{L0} + \sum_{i=1}^{12} a_i \cos i\omega t + \sum_{i=1}^{11} b_i \sin i\omega t \quad (9)$$

これは、24点法を用いるとして、(8)式において $n=12$ としたものである。

(2)RKG法^{3,4)}による微分方程式の解法 RKG法は、一階常微分方程式の解法であるから、RKG法を使用するためには、本モデルの二階常微分方程式に新しい変数を導入し、一階常微分方程

式に変換する必要がある。本モデルについて示せば、次のようになる。まず、次の変数を導入する。

$$\begin{aligned}
 x_1 &= z \\
 x_2 &= \dot{z} \\
 x_3 &= \nu \\
 x_4 &= \dot{\nu} \\
 \dot{x}_1 &= z \\
 \dot{x}_2 &= \dot{z} = N_1 (F_L - F_R) - N_2 \dot{\nu} - N_3 \nu - N_4 \dot{z} - N_5 z \\
 \dot{x}_3 &= \nu \\
 \dot{x}_4 &= \dot{\nu} = M_1 F_L + M_2 F_R - M_3 \dot{\nu} - M_4 \nu - M_5 \dot{z} - M_6 z
 \end{aligned}$$

このような変換により、RKG法の適用が可能となる。

(3)初期条件 各変数の微分値は0とすると、次のようになる。

$$\dot{z} = \ddot{z} = \dot{\nu} = \ddot{\nu} = 0 \quad (10)$$

次に、 z 、 ν については第1図に関する連立方程式を用いると、次のように求められる。

$$\begin{aligned}
 \Sigma F_L &= 0 \\
 G_1 + G_2 + F_R \sin \varepsilon - F_L \sin \varepsilon &= 0 \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma M &= 0 \\
 G_1 a' - G_2 b' + F_R (s_2 \cos \varepsilon - s_4 \sin \varepsilon) \\
 + F_L (s_4 \sin \varepsilon - s_2 \cos \varepsilon) &= 0 \quad (12)
 \end{aligned}$$

したがって、(11)、(12)式より、 G_1 、 G_2 は次のように表せる。

$$G_1 = E_1 (F_L - F_R) \quad (13)$$

$$G_2 = E_2 (F_L - F_R) \quad (14)$$

ここに、

$$E_1 = \frac{E_3}{a' + b'}$$

$$E_2 = \sin \varepsilon - E_1$$

$$E_3 = b' \sin \varepsilon + s_2 \cos \varepsilon - s_4 \sin \varepsilon$$

上式の G_1 、 G_2 は、動モデルによるそれぞれ前後輪の横抵抗であるので、次式で表すことができる。

$$G_1 = k_1 (z + a' \nu) + c_1 (\dot{z} + a' \dot{\nu}) \quad (15)$$

$$G_2 = k_2 (z - b' \nu) + c_2 (\dot{z} - b' \dot{\nu}) \quad (16)$$

初期条件によって、(15)、(16)式は次のようになる。

$$G_1 = k_1 (z + a' \nu) \quad (17)$$

$$G_2 = k_2 (z - b' \nu) \quad (18)$$

(17), (18)式を(13), (14)式に代入すると, 次のようになる.

$$k_1 (z + a' \nu) = E_1 (F_L - F_R) \quad (19)$$

$$k_2 (z - b' \nu) = E_2 (F_L - F_R) \quad (20)$$

したがって, (19), (20)式より, z , ν が求められる.

$$z = E_4 (F_L - F_R) \quad (21)$$

$$\nu = E_5 (F_L - F_R) \quad (22)$$

ここに,

$$E_4 = \frac{k_2 b' E_1 + k_1 a' E_2}{k_1 k_2 (a' + b')}$$

$$E_5 = \frac{E_1 - E_4 k_1}{a' k_1}$$

トラクタの横方向のバネ定数と粘性抵抗係数については, 圃場試験で得たヨー振動の波形とシミュレーションによる波形と比較しながら, 両者の差が小さくなるように修正を加えながら求めた結果である.

この動的モデルにより, 従来の運動解析に加えて, ヨー運動の解析が可能と考えられる.

実験装置及び方法

1. 供試トラクタと測定方法

供試機は, 定格出力12.5kW (17PS) /2500rpmの後輪駆動トラクタで, 耕うん幅1300mm, 耕うん刃(なたづめ)30本のサイドドライブ式ロータリ耕うん部を装着している. 耕うん部は標準装備のもので尾輪付きである.

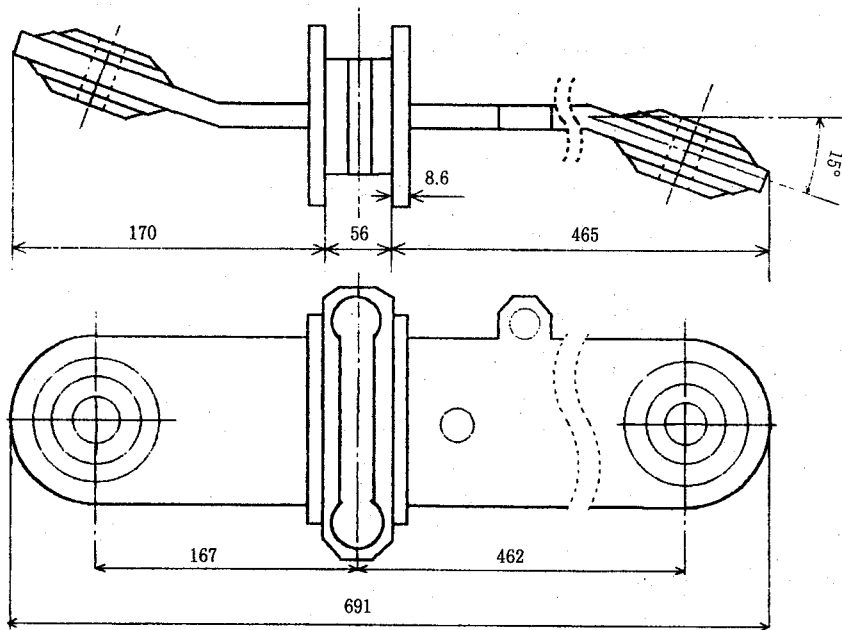
三点リンクの全長は, 穴中心が上部リンク205mm, 下部リンク(投影寸法)625mmである.

下部リンクは, 断面寸法がひずみゲージ直接貼付けによる力の検出には過大なので, 感度の高い八角リングを用いた.

下部リンクには, 左右両リンクの直線部を切断し, 第3図のように取り付けた.

2. 圃場条件

土壌は砂壤土で, これを碎土, 均平後ローラによる鎮圧を行い, 降雨後適当な水分に乾燥した状態の硬軟両土壌条件で試験を行った. 試験時の平均含水比および平均土壌硬度(山中式硬度計による)を第1表に示す.



第3図 下部リンク

第1表 土壌条件

		含水比 (%)	硬度 (kPa)
軟	土 a	18.7	500
	b	19.6	360
	c	20.0	255
硬	土 a	17.0	762
	b	17.9	1160
	c	18.5	920

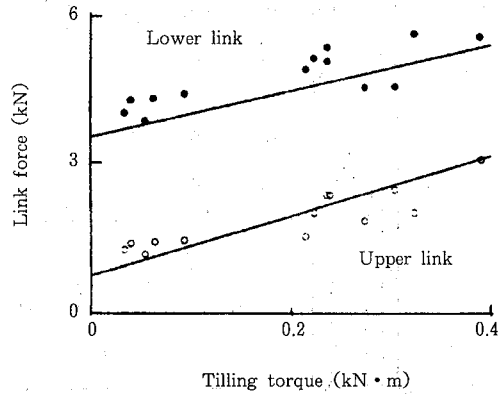
3. 耕うん方法

機関回転速度をほぼ2500rpmに設定し、耕深12cmを基準として、自由リンク状態で平面耕を行った。制御リンクの場合にはリフトロッドでの制御状態で平面耕を行った。

結果及び考察

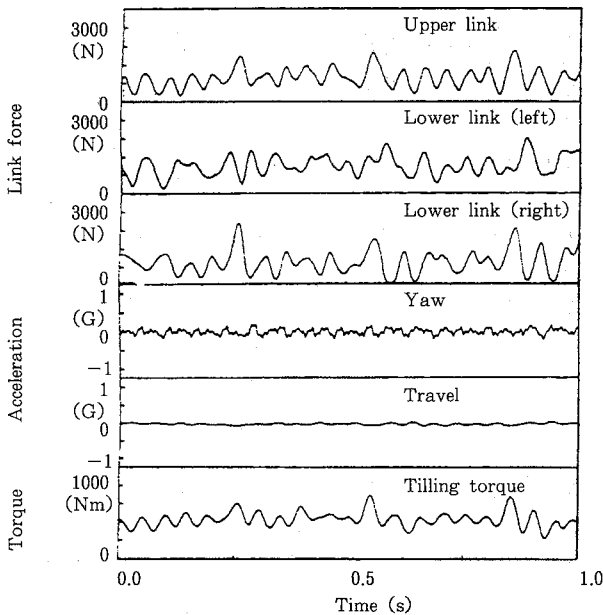
下部リンクの作用力は、耕うん刃の切削作用によって生じる各部への土の抵抗や慣性による抵抗

によって変動する。耕うん軸のトルクは主として、耕うん刃に作用する土の抵抗（耕うん反力）によるものであるので、リンク作用力に対する影響は大きい。その一例を第4図に示す。

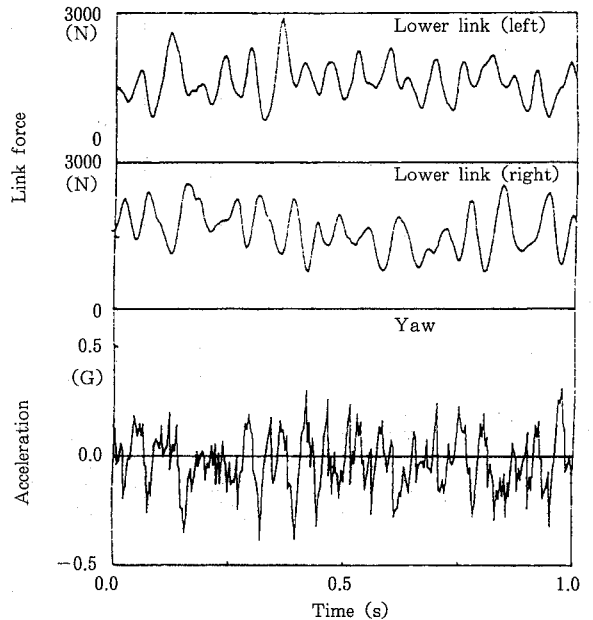


第4図 耕うんトルクとリンク作用力の関係（制御リンク）

また、第5図、第6図に示すように下部リンクでは左右のリンクに、耕うん刃配列の左右非対称性によると思われる作用力変動の時間的ずれが見られ、その変動の山はほぼ交互に現れる。耕うん刃を左右非対称に配列するのは耕うんトルク低減のためである。



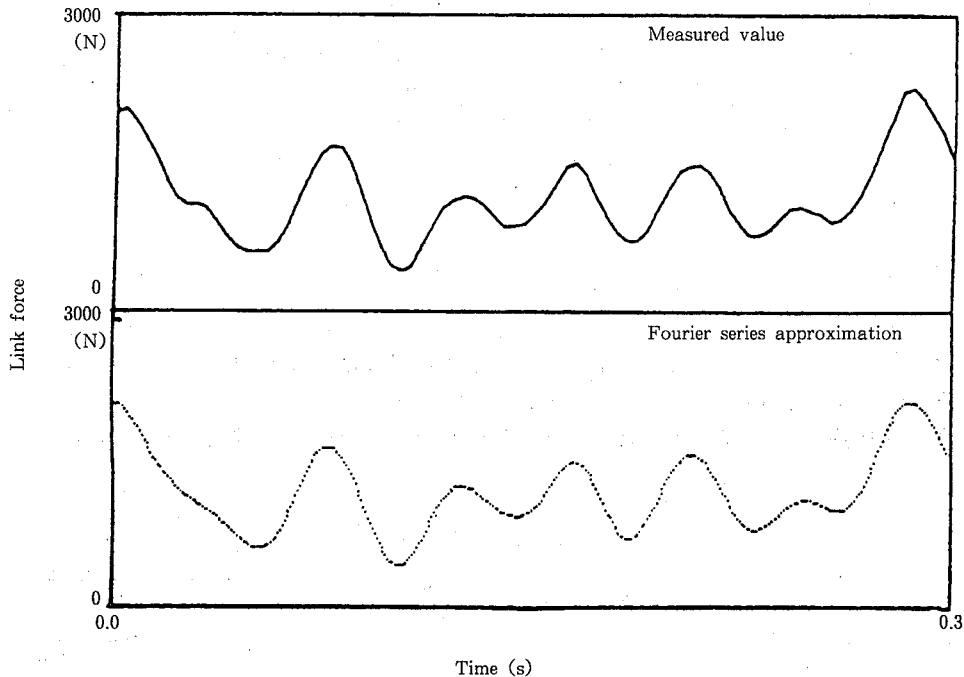
第5図 測定例



第6図 下部リンクの作用力とヨー振動

実験値を観測すれば、左下部リンクの作用力が極大値の時に右下部リンクの作用力は極小値となり、ヨー振動はプラスピークになる。左下部リンクの作用力が極小値の時に逆に右下部リンクの作用力は極大値となり、ヨー振動はマイナスピークになる。

入力関数としての左右下部リンクの作用力は、(9)式を用いて、第7図のようにフーリエ展開による曲線として表示される。



第7図 シミュレーションに用いた下部リンク作用力波形

求めた左右下部リンクの作用力と前に検討した初期条件を用いて、(3)、(6)式をRKG法で解析した結果(シミュレーション)は、次のとおりである。

ヨー振動は直接測定が困難なので、加速度計を用いて換算し、求められる。すなわち、実験値 ζ は次式のようにヨー振動 $\dot{\theta}$ と横振動 \dot{z} の組み合わせとして求めた。

$$\zeta = \dot{z} + l\dot{\theta} \quad (23)$$

ここで、

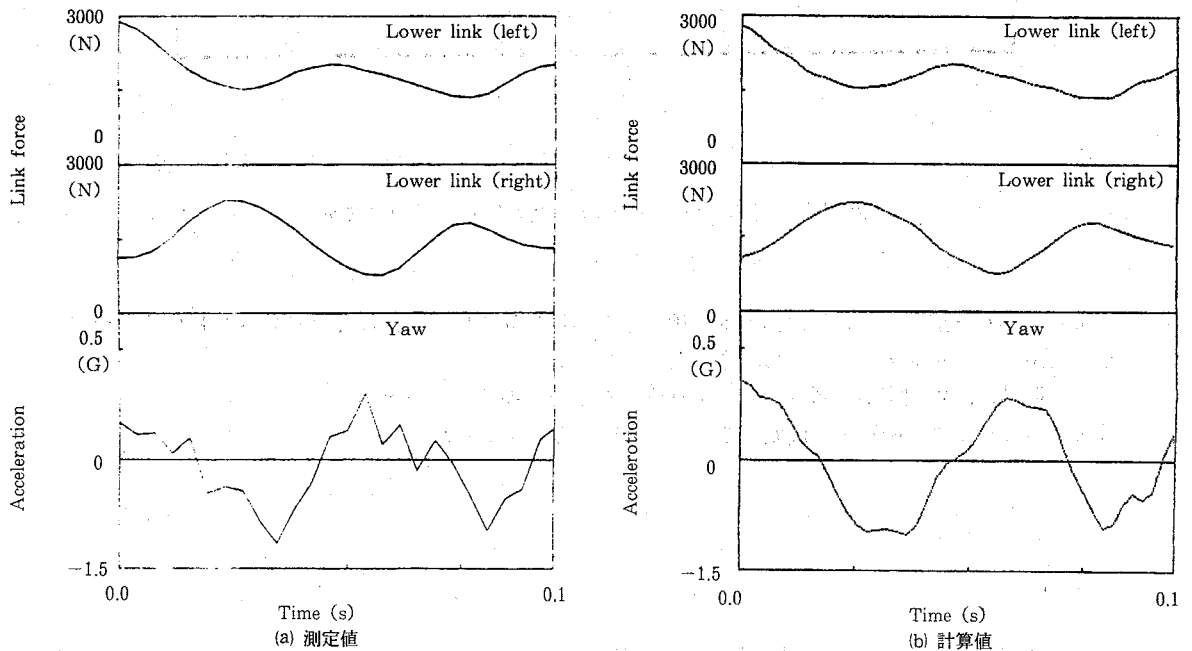
l: 重心から加速度計の取付け点までの距離

計算に用いたモデルのパラメータは第2表に示したとおりである。

第2表 シミュレーションに使用した基本パラメータ

m_r	690	kg	a'	86.7	cm
J_y	3270	kg cm ²	b'	52.7	cm
k_1	4020	N/cm	s_2	18.0	cm
k_2	1660	N/cm	s_3	44.0	cm
k_3	1660	N/cm	s_4	62.0	cm
k_4	1660	N/cm	l	137.0	cm
c_1	65	N s/cm	ϵ	10	°
c_2	46	N s/cm			
c_3	40	N s/cm			
c_4	40	N s/cm			

第8図において、実験値の波形に振幅が小さく、比較的周波数の高い成分が見られるが、これはエンジンの振動の影響によるものである。第8図から判断されるように、シミュレーションと実験で得た両波形が、比較的よい一致を示したので、実用上はこのモデルで十分近似できると考えられる。



第8図 実機とシミュレーションモデルによる動的挙動の比較

摘 要

- (1) トラクタのヨー運動は、下部リンク左右交番荷重による影響が大きい。
- (2) 下部左右リンクに作用する左右交番荷重はフーリエ展開によって表すことができる。
- (3) 交番荷重によるトラクタのヨー運動の解析は、動的モデルに下部リンク作用力のフーリエ近似入力を加えることにより可能である。シミュレーションと実験で得た両波形が、比較的よい一致を示したので、実用上は、このモデルで十分近似できると考えられる。

キーワード：トラクタ，ヨーイング，交番荷重，シミュレーション。

文 献

- 1) 池見隆男：ロータリ耕用三点リンクに関する基礎研究（第3報），農機誌，49（6），571-579（1987）。
- 2) 近江谷和彦：農用トラクタの回転振動に関する研究（第1報），農機誌，47（3），321-327（1985）。
- 3) 黒田英夫：機械技術者のための電子計算機入門（9），機械の研究，20（1），77-79（1968）。
- 4) 日本原子力研究所鉄道技術研究所共編，FORTRANによる数値計算ハンドブック，184-187，オーム社，東京（1971）。

平成6（1994）年9月26日受理

平成6（1994）年12月26日発行

