

ロータリ耕用三点リンクに関する基礎研究
——仮想ヒッチ点位置に関する設計論的考察——

池 見 隆 男
(農学部農業機械学研究室)

Study on Three-point Linkage for Rotary Tilling Tractor
——Theoretical Considerations in Position of Virtual Hitch Point——

Takao IKEMI

Laboratory of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture

Abstract: The author considered the rational virtual hitch point which contributes to stabilizing rotary tillage operations. The stability conditions include the constant depth of tillage, the stability of traveling and the low pitching motion. The range of the virtual hitch point for these conditions seems to be located near the lower part of the rear axle. The results almost agree with the distribution of virtual hitch points in standard tillage depth of existing small-sized tractors.

緒 言

三点リンクヒッチの作動特性は、仮想ヒッチ点の位置によって定まり、その位置は、トラクタ本体とロータリ耕うん部の相互作用に影響を及ぼす。したがって、仮想ヒッチ点の位置は、作業の安定性に寄与する重要な因子と考えられる。仮想ヒッチ点の位置を示す式については、別報¹⁾において導出し、さらに現存する中小形トラクタの傾向を調べた。

本報では、ロータリ耕うん作業(ダウンカット耕)の安定性を支配する諸条件に対する仮想ヒッチ点の合理的な位置を解析的に求め、設計論的考察を行った。

ロータリ耕うんトラクタに作用する諸力

ロータリ耕うん作業を行う後輪駆動トラクタにおいて、定常状態では、トラクタ本体および耕うん部には Fig. 1 に示すような外力が作用する。

以下に用いる記号は次の通りである。

- V_x, V_y : 後輪接地点を原点とする x, y 軸で表示する仮想ヒッチ点位置の座標
- G_x, G_y : 同様に、トラクタ重心位置の座標
- L : トラクタの軸距
- L_1, L_2 : トラクタ重心から、それぞれ前車軸中心および後車軸中心までの水平距離
- L_3 : 後車軸中心から耕うん軸中心までの水平距離
- L_4 : 耕うん部重心から耕うん軸中心までの水平距離
- L_5 : 耕うん軸中心から尾輪接地点までの水平距離
- H : 耕深

- h : 耕うん抵抗作用点の耕盤からの高さ
 h_3 : 尾輪接地点反力作用点の深さ
 r : 耕うん刃先端回転半径
 e_1, e_2 : それぞれ前輪および後輪接地反力作用点から車軸中心までの水平距離
 e_3 : 尾輪接地反力作用点から尾輪軸中心までの水平距離
 e : 耕うん軸中心から耕うん抵抗作用点までの水平距離
 δ : 耕うん部合力の作用角
 θ : 耕うん抵抗の作用角
 W_T : トラクタ重量
 W_R : 耕うん部重量
 R_1, R_2 : それぞれ前輪および後輪接地反力 (荷重)
 R_3 : 尾輪接地反力 (荷重)
 R : 耕うん抵抗
 F : 耕うん部合力
 M_G : トラクタ重心に関するピッチモーメント
 μ_1 : 前輪の転がり抵抗係数
 μ_2 : 尾輪の転がり抵抗係数
 μ_3 : 許容滑り率における駆動輪の制動力係数

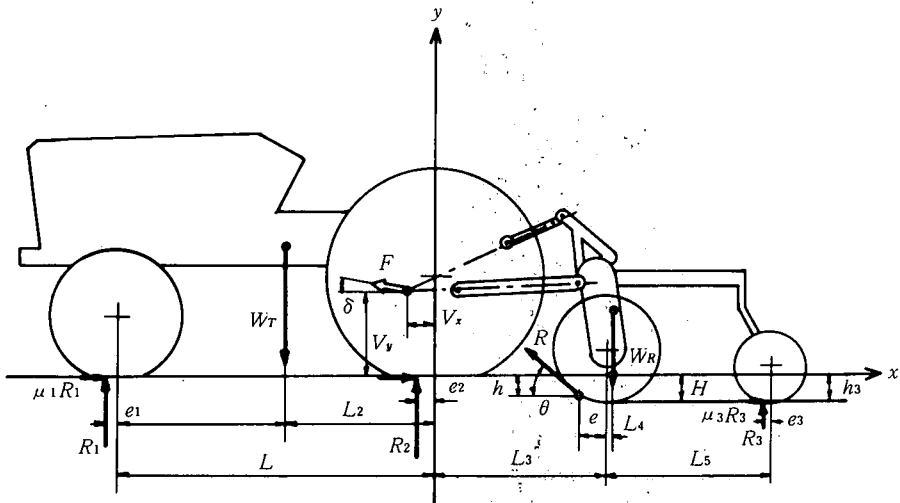


Fig. 1. Forces acting on a rotary tilling tractor.

仮想ヒッチ点の位置に関する設計論的考察

1. 耕深安定性に対する影響 ロータリ耕において、作業安定条件の一つは、耕深が一定に維持されることである。石礫に対する耕うん刃の打撃による耕うん部の跳躍は、機体の損傷を防ぐ意味から必要であるが、このような過度の跳躍はあくまで異常現象である。一般には、土壌硬度の変化による耕深の変動がある。この浮上（一種の跳ね上げ）現象は、耕うん部に作用する諸外力による仮

想ヒッチ点(瞬間回転中心)まわりのモーメントのつり合いが破れた時に生じる。また、これに対して下方への耕うん部の回転は、尾輪による支持または下部リンクの油圧支持があるため、普通生じない。

したがって、耕深の安定は、自由リンクの場合、尾輪の支持によって得られ、その支持反力つまり接地荷重が安定を左右する。

尾輪接地荷重は、Fig. 1 において、仮想ヒッチ点まわりのモーメントのつり合いより、(1)式のように表わされる。

$$R_3 = \frac{(L_3 + L_4 - V_x)W_R - (L_3 - e - V_x)R \sin\theta + (H - h + V_y)R \cos\theta}{\mu_3(V_y + h_3) - V_x + L_3 + L_5 - e_3} \dots\dots\dots (1)$$

一定耕深が得られるためには、尾輪接地荷重 R_3 が常に作用していなければならない。しかし、過大であると、自由リンクでは尾輪支持部の強度を左右するとともに、尾輪沈下が大きくなり既耕地の鎮圧を招く。これが固定リンクの場合には、油圧支持機構の容量を必要以上に大きくする必要が生じる。すなわち、尾輪接地荷重は、 R_{30} を限界とする範囲で作用する必要がある。

$$R_{30} \geq R_3 \geq 0 \dots\dots\dots (2)$$

R_{30} の値は、最大で約 1.0 KN 程度であれば妥当であろう。

したがって、尾輪接地荷重が(2)式を満足するように、仮想ヒッチ点の位置を定めれば、耕深の安定が得られる。

Fig. 2 は、小、中形トラクタの尾輪接地荷重から求めた仮想ヒッチ点の耕深安定域を図示した一例である。

計算に用いた主な特性値は、 $\mu_3 = 0.3$ 、 $\theta = 35^\circ$ である²⁾。耕うん抵抗 R の値は、次式から算出した全負荷およびその $\frac{1}{2}$ を用いた。

$$R = \frac{9.55 E \eta}{n_e r'} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 R : 全負荷耕うん抵抗 (kN)、 E : 塔載機関定格出力 (kW)、 η : 動力伝達効率 (0.85)、 n_e : 耕うん軸回転速度 (200 rpm)、 $r' = 1.02 r$ (m)。また、適用したトラクタの諸元を Table 1 に示す。

Table 1 Specifications of the tractors applied

Model	1	2	3
Power (kW)	12.5	16.9	30.9
R_{200} (kN)	2.03	2.75	4.92
W_T (kg)	735	935	1430
W_R (kg)	200	220	250
L (mm)	1430	1580	1800
L_2 (mm)	658	667	845
L_3 (mm)	850	960	1029
L_5 (mm)	750	750	750
r (mm)	245	245	250

Fig. 2 において, x - y 平面における等尾輪接地荷重線は直線となり, この直線を限界として,

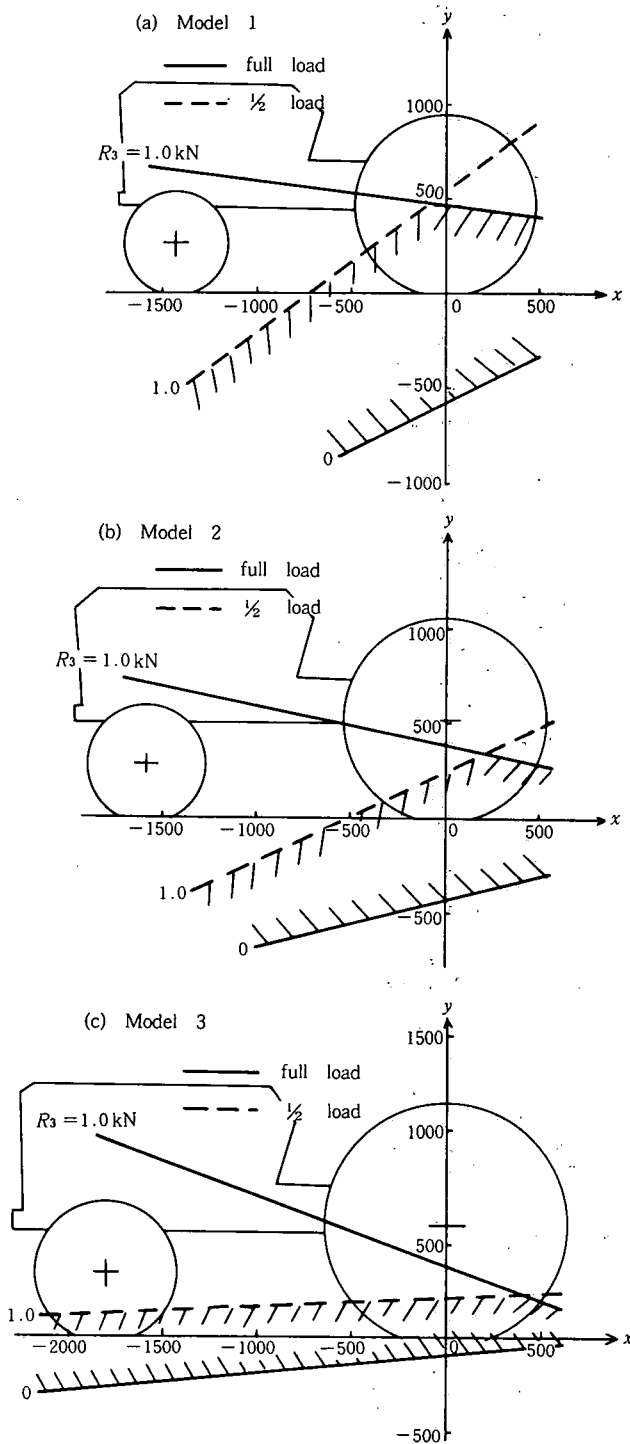


Fig. 2. Position of virtual hitch point stabilizing depth of tillage.

斜線で囲まれた範囲が1/2負荷から全負荷に対応する耕深安定条件を満たす仮想ヒッチ点の位置である。尾輪荷重に対する仮想ヒッチ点の影響は、トラクタの大小、負荷の大きさによって異なる。小形の場合、全負荷では上下方向に影響が大きく、前方に広がる範囲となるが、軽負荷では前後方向の影響が大きく、許容域は後方となる。したがって、負荷を考慮した仮想ヒッチ点位置の耕深安定域は、およそ後車軸下部近傍になる。

30 kW 級の中形トラクタの場合には、全負荷において、許容域は、小形同様後車軸下部から前方へ広がるが、軽負荷では上下方向の影響が大きく、限界は地表面に近くなる。したがって、この場合の耕深安定域は、後車軸下方から前方の地表面に近い部分となる。

2. 走行安定性に対する影響 走行が安定であるためには、少なくとも次の二つの条件を満たす必要がある。すなわち、耕うん部からの推進力に対抗する制動作用が十分であること、さらに、かじ取りに必要な前輪接地荷重が十分確保されることである。

(1) 制動安定条件 機体の飛び出しがなく、安定に走行するためには、耕うん部からの推進力に対抗する駆動輪の制動能力が十分でなければならない。この制動力は、けん引力と同様の概念をもつと考えることができる。すなわち、制動力は駆動輪接地荷重に比例すると考えられており、接地荷重と制動力係数と称する係数との積で表現し得る⁴⁾。

後輪駆動トラクタにおける制動安定条件は、次のように表わされる。

$$\mu_a R_2 \geq F_x - \mu_1 R_1 \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$F_x = F \cos \delta = R \cos \theta - \mu_3 R_3$$

耕うん作業中の後輪荷重は、前輪接地反力作用点に関するモーメントのつり合いより、次のように表わし得る。

$$R_2 = \frac{L_1 + e_1}{L + e_1 - e_2} W_T - \frac{(L + V_x + e_1) F_y + V_y F_x}{L + e_1 - e_2} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$F_y = F \sin \delta = R \sin \theta - W_R + R_3$$

前後輪接地反力の作用深さは無視した。

したがって、(4)式を満足する仮想ヒッチ点位置の範囲は、(1)、(4)および(5)式より次のように導かれる。

$C > 0$ のとき、

$$V_y \leq \frac{C_2}{C_1} V_x + \frac{C_3}{C_1} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

$$C_1 = \rho_a \mu_3 (L + L_3 - e + e_1) R \sin \theta + \rho_a \{L + L_3 + L_5 - \mu_3 (H - h + h_3) + e_1 - e_3\} R \cos \theta - \mu_3 \{ \rho_a (L_1 + e_1) + \mu_1 \} W_T - \rho_a \mu_3 (L + L_3 + L_4 + e_1) W_R$$

$$C_2 = \{ \mu_3 - \rho_a(L_5 + \mu_3 h_3 + e - e_3) \} R \sin \theta + \{ 1 - \rho_a(H - h) \} R \cos \theta - \{ \rho_a(L_1 + e_1) + \mu_1 \} W_T - \{ \rho_a(L_4 - L_5 - \mu_3 h_3 + e_3) + \mu_3 \} W_R$$

$$C_3 = \{ \rho_a(L_1 + e_1) + \mu_1 \} (L_3 + L_5 + \mu_3 h_3 - e_3) W_T - \{ \rho_a(L + e_1)(L_5 + \mu_3 h_3 + e - e_3) + \mu_3(L_3 - e) \} R \sin \theta - [L_3 + L_5 + \mu_3 h_3 + \{ \rho_a(L + e_1) - \mu_3 \} (H - h) - e_3] R \cos \theta - \{ \rho_a(L + e_1)(L_4 - L_5 - \mu_3 h_3 + e_3) - \mu_3(L_3 + L_4) \} W_R$$

$$\rho_a = \frac{\mu_a - \mu_1}{L + e_1 - e_2}$$

$C < 0$ の場合は、(6)式の不等号の向きが反対になる。

Fig. 3 は、仮想ヒッチ点位置の制動安定限界を、(6)式から求めた等負荷限界線で表わした例である。用いた特性値は、 $\mu_1 = 0.1$, $\mu_3 = 0.3$, $\rho_a = 0.4^{\circ}$, $\theta = 35^{\circ}$ である。 e_1 , e_2 は明確には得られないので、いずれも車軸中心の高さ $\times 0.1$ とした。 e_3 は無視した。耕うん抵抗は前節同様(3)式によって求めた全負荷時の値を R_{200} とし、全負荷に対する比で表わした。

Fig. 3 において、斜線内が(6)式を満足する範囲で、機体の飛び出しのない走行が可能な仮想ヒッチ点位置の範囲を表わす。ただし、リンクの位置的制約は考えていない。この制動限界を示す直線の位置は、耕うん負荷の影響が極めて大きく、軽負荷では機体のはるか上方に存在するが、図に示すように、負荷の増大に伴ない下方へ低下してくる。耕うん軸低回転時の重負荷では、でき得る限り下方が望ましいといえる。この傾向は、出力の大きいトラクタほど顕著になる。

したがって、どの程度の負荷に対処するかは問題であるが、耕うん軸回転速度 200 rpm における全負荷程度に対しては、仮想ヒッチ点位置は、後車軸より下方から前方へ広がる範囲にあるのが望ましいといえる。

(2) かじ取り安定条件 仮想ヒッチ点に対する耕うん部抵抗合力の作用によって重量転移を生じ、前輪荷重の変化が起る。かじ取りが安定に行われるためには、前輪荷重として、かじ取りに必要なコーナリングフォースを発生し得る大きさが必要である。その前輪荷重の大きさは、トラクタで約 2 kN, 500 kg未満の軽車両では全重量の $\frac{1}{3}$ 以上とされている⁶⁾。

耕うん作業中の前輪荷重は、次式で表わされる。

$$R_1 = \frac{(L_2 - e_2) W_T + (V_x + e_2) F_y + V_y F_x}{L + e_1 - e_2} \dots\dots\dots(7)$$

かじ取りが安定に行われるためには、

$$R_1 \geq k W_T \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 $k W_T$ はコーナリングフォース発生に必要な限界荷重であり、 k は前輪荷重を与える係数である。

したがって、仮想ヒッチ点位置に対するかじ取り安定限界は、(1), (7), (8)式より次式のように導かれる。

$K_1 > 0$ のとき、

$$V_y \geq \frac{K_2}{K_1} V_x + \frac{K_3}{K_1} \dots\dots\dots(9)$$

ただし,

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \mu_3(L_3 - e + e_3) R \sin \theta + \{L_3 + L_5 + e_2 - e_3 - \mu_3(H - h + h_3)\} R \cos \theta \\
 &\quad + \mu_3\{L_2 - e_2 - k(L + e_1 - e_2)\} W_T - \mu_3(L_3 + L_4 + e_2) W_R \\
 K_2 &= \{L_2 - k(L + e_1 - e_2) - e_2\} W_T - (L_5 + \mu_3 h_3 + e - e_3) R \sin \theta - (H - h) R \cos \theta \\
 &\quad - (L_4 - L_5 - \mu_3 h_3 + e_3) W_R \\
 K_3 &= \{k(L + e_1 - e_2) - L_2 + e_2\} (L_3 + L_5 + \mu_3 h_3 - e_3) W_T - (L_3 + \mu_3 h_3 + e - e_3) e_2 \\
 &\quad R \sin \theta - (H - h) e_2 R \cos \theta - (L_4 - L_5 - \mu_3 h_3 + e_3) e_2 W_R
 \end{aligned}$$

(9)式による仮想ヒッチ点位置のかじ取り安定限界は、Fig. 3 に示すように、いずれの場合も機体のかなり下方に存在する。これはトラクタの出力に無関係とみられるので、ロータリダウンカット耕の場合、仮想ヒッチ点位置の影響はほとんどないとみて差しつかえない。したがって、かじ取り安定性は通常確保されていると考えられる。

3. ピッチ運動に対する安定性 耕うん抵抗の変動に伴う耕うん部抵抗合力の変動は、抵抗合力のピッチモーメントが大きい場合、トラクタ本体のピッチ振動の主因となる。ピッチ振動低減のためには、抵抗合力のピッチモーメントが小であることを要する。すなわち、抵抗合力の作用線が重心に近いことが必要である。

ピッチモーメント M_G は、Fig. 1 より、次のように表わされる：すなわち、抵抗合力 F およびその作用角 δ は、

$$\begin{aligned}
 F \sin \delta &= R \sin \theta - W_R + R_3 \\
 F \cos \delta &= R \cos \theta - \mu_3 R_3
 \end{aligned}$$

より、

$$\delta = \tan^{-1} \frac{R \sin \theta - W_R + R_3}{R \cos \theta - \mu_3 R_3} \dots\dots\dots(10)$$

である。また、合力 F の作用方向と仮想ヒッチ点からトラクタ重心を通る直線とのなす角 γ は、

$$\gamma = \delta - \tan^{-1} \frac{G_y - V_y}{V_x - G_x} \dots\dots\dots(11)$$

これらを用いて、ピッチモーメントは次のように表わされる。

$$M_G = F \sqrt{(G_x - V_x)^2 + (G_y - V_y)^2} \sin \gamma \dots\dots\dots(12)$$

(12)式に基き、特性値を前節同様として、実在トラクタに対する仮想ヒッチ点位置の等ピッチモーメント線図を Fig. 4 に示す。ピッチモーメントの符号は、Fig. 1 において重心に関し反時計まわりを正とする。等ピッチ線は直線で表わされ、この直線上の仮想ヒッチ点は同一値のピッチモーメントとなる。

抵抗合力によるピッチ振動を防ぐには、仮想ヒッチ点が重心を通る等ピッチモーメント線近傍にあればよい。しかし、その許容限界は、 $x-y$ 平面における重心に関する慣性モーメントに依存するので、明確には得られない。したがって、トラック質量は出力とほぼ関連するので、出力によって大別すれば、次のようになる。すなわち、ピッチ振動に対する仮想ヒッチ点の位置は、20 KW 級以下のトラクタでは、後車軸からほぼ水平な延長線の近傍であればよく、それ以上のトラクタで

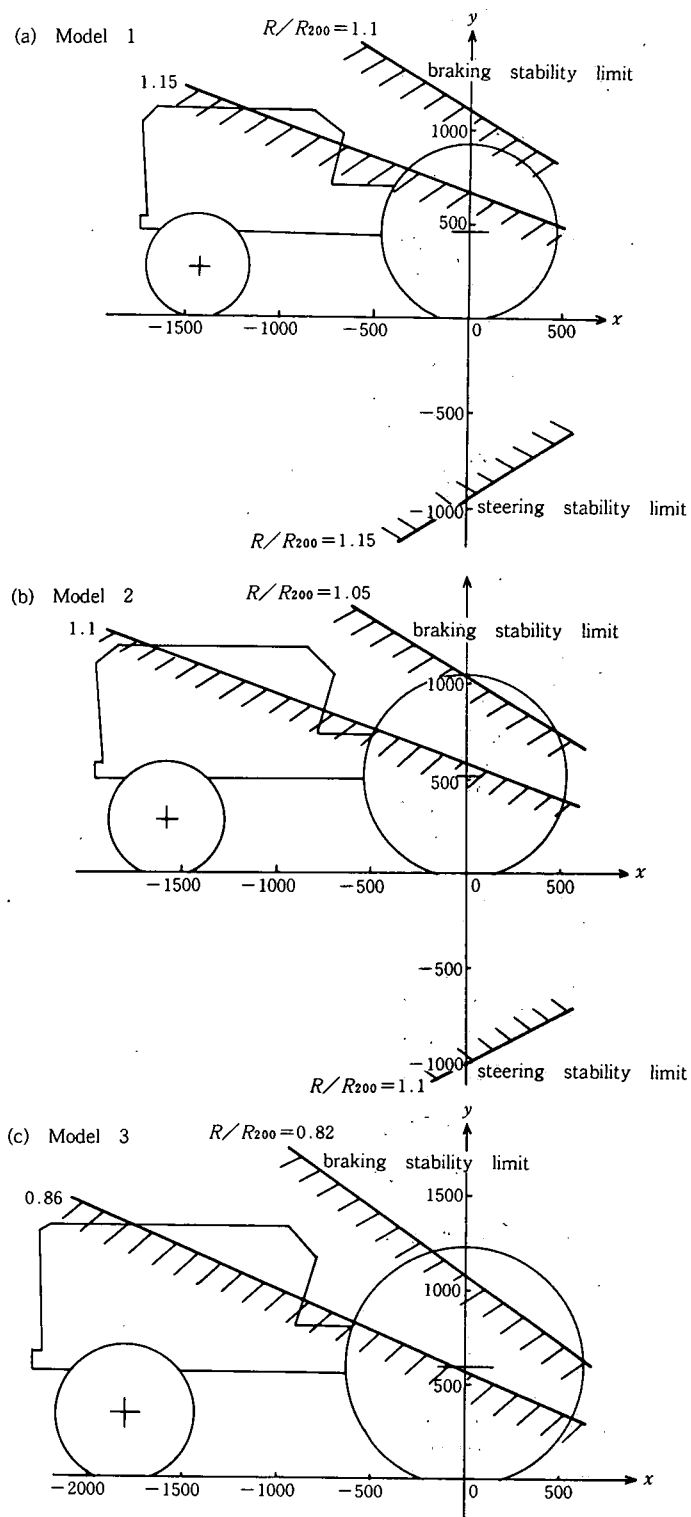


Fig. 3. Position of virtual hitch point stabilizing braking to rotary tiller thrust and steering.

は、後車軸から重心への延長線の下部近傍と考えればよい。これは、ピッチ運動の方向からみても後車輪への重量転移を起させる方向であるから、走行の安定上有利と考えられる。

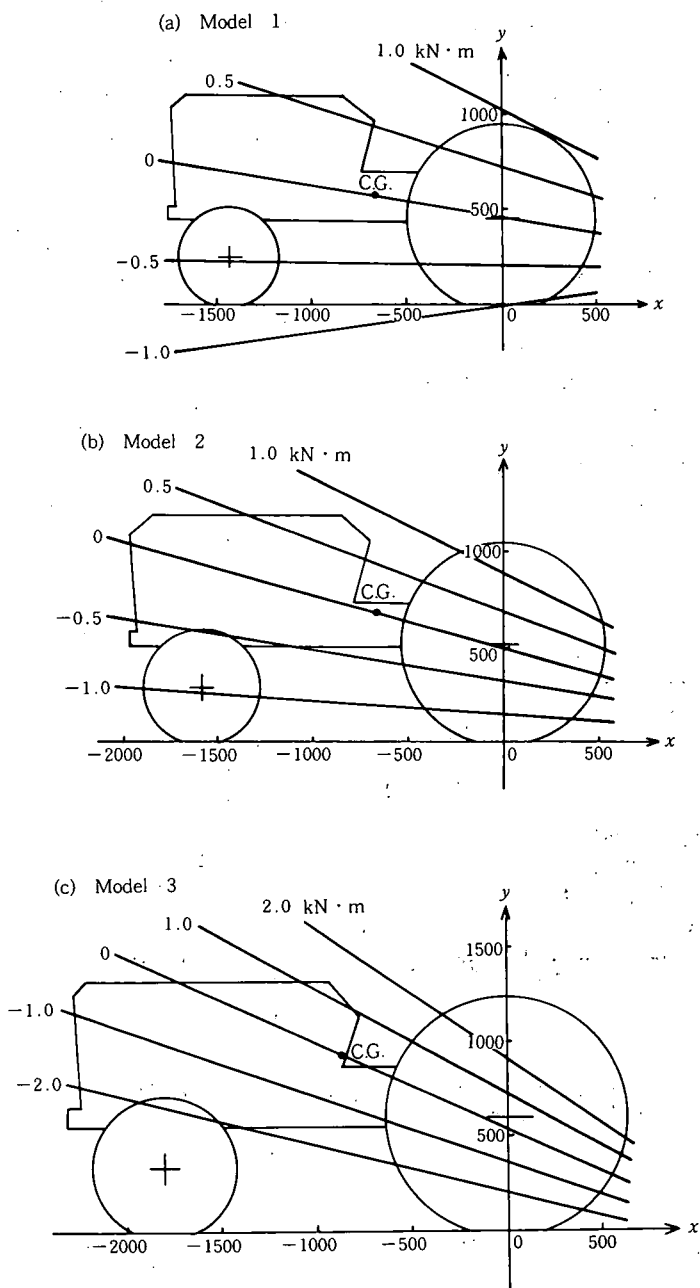


Fig. 4: Pitch moment contour diagram of rotary tilling tractor.

仮想ヒッチ点の耕うん作業安定位置

前章において、各条件に対する仮想ヒッチ点の作業安定位置について解析し、考察を行ったが、要約すれば次のようになる。

- 1) 耕深安定のためには、仮想ヒッチ点は、でき得る限り後車軸より下方が望ましく、特に、小形トラクタは後車軸の下方近傍がよい。
- 2) 走行安定のためには、駆動輪の安定な制動作用が必要であり、重量転移を考慮すれば、でき得る限り下方が望ましい。
かじ取り安定については、通常の耕うん条件では確保されている。
- 3) ピッチ運動安定のためには、後車軸近傍ないしは後車軸と重心を結ぶ直線の下部近傍が望ましい。

以上総合して判断すれば、各条件を満足する仮想ヒッチ点の位置は、トラクタの大小を問わず後車軸の下部近傍が妥当と考えられる。このことは、現存するトラクタの標準耕深における仮想ヒッチ点位置の分布¹⁾とはほぼ一致する。

Fig. 5 は、仮想ヒッチ点の作業安定位置を示す結果の一例である。

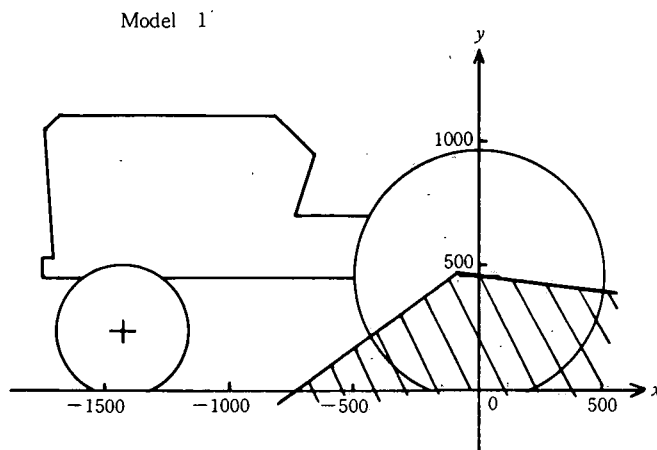


Fig. 5. Position of virtual hitch point stabilizing rotary tillage operation.

結 語

ロータリ耕用三点リンク装着トラクタにおいて、仮想ヒッチ点位置が耕うん作業の安定性に寄与する影響を考察した。その結果、通常行われるロータリダウンカット耕における合理的な仮想ヒッチ点位置は、後輪駆動トラクタにおいては、後車軸の下部近傍であることが判明した。

この研究に対し、貴重な御助言並びに御討議をいただいた九州大学農学部坂井純教授に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 坂井純・池見隆男・唐沢宏, ロータリ耕用3点リンクに関する基礎研究(第1報). 農機誌, 46(4), 489-494 (1985)
- 2) 農業機械学会, 新版農業機械ハンドブック, p. 430, コロナ社, 東京(1984)
- 3) 柴田安雄・坂井純, ロータリ耕トラクタの動特性に関する設計論的研究(第3報). 農機誌, 41(2), 207-214 (1979)
- 4) 柴田安雄・坂井純, 同上(第2報). 農機誌, 41(1), 37-42 (1979)
- 5) 池見隆男・土居栄城, 農用トラクタ駆動輪の推力負荷に対する制動特性. 高知大学研報告, 33, 1-8 (1984)
- 6) 農業機械学会, 農業機械ハンドブック, p. 363-364, コロナ社, 東京(1969)

(昭和60年9月28日受理)

(昭和61年3月14日発行)

