

乗用トラクタの座席ペダル配置の踏力による解析

御手洗正文・木下 統・木田博隆

宮崎大学農学部生産環境システム学講座

(2005年1月28日 受理)

An analysis of seat pedal arrangement based on foot pressing force in a riding tractor

Masafumi MITARAI, Osamu KINOSHITA, Hirotaka KIDA

Division of Agricultural Environmental Systems, Faculty of Agriculture, University of Miyazaki

Summary: The seat pedal arrangement of a riding tractor was analyzed by foot pressing force using models of driving devices. Measurements were taken to obtain the rating of perceived exertion and working posture. The main results were as follows: 1) The optimal values of design element were as follows: pedal direction angle of 15° for the brake and 10° for the accelerator; seat pedal distance of 600 mm for short stature, 700 mm for middle stature and 800 mm for tall stature; the seat height of 410 mm; and pad angle of 40~60°. 2) The optimal value analyzed by foot pressing force agrees with the optimal value analyzed by rating of perceived exertion. 3) The angles of body part at the time of maximum foot pressing force were waist 95°, knee 125° and ankle 70°.

Key words: Rating of perceived exertion, Riding tractor, Seat pedal arrangement, Static maximum foot pressing force, Working posture.

緒言

農業機械分野では、作業環境の改善が求められていることから、人間工学に基づいた設計が重要性を増している。本研究で取り上げた乗用トラクタは、農業機械の中でも耕耘・運搬等の幅広い作業に使用され使用頻度が高く、農業従事者とも密接な関係を持っていることから、その設計要素の人間工学的な解明が特に急がれている。

日本においては、乗用トラクタを輸入に頼っていた時期は、操縦席周りの諸寸法が日本人の体型に適合していないと指摘されてきた。その後、今

日までに日本人の体型に適合したものが開発されてきているが、より快適な作業環境を追求するために、操縦席周りの機器類の最適配置を解明し、人間工学的な設計を行っていくことが重要である(酒井 1979; Yadav, Tewari 1998)。

以上の背景から、本研究は、乗用トラクタの座席ペダル配置に着目し、これらの設計要素の解明を目的とした。

座席ペダル配置の検討の視点の一つに静的最大踏力がある。これは、最大踏力を出せる座席ペダル配置を最適とするものである。本研究ではこの

手法を用いた。

静的最大踏力を指標として座席ペダル配置を検討した例はすでにあるが (Hertzberg, Burke 1971; Mortimer 1974; 酒井 1979; Pheasant, Harris 1982; Yadav, Tewari 1998; Lara-Lopez *et al.* 1999), その中で, 乗用トラクタ操縦者の特殊な動作を考慮した例も数例ある. 例えば, Pheasant, Harris (1982) は, 各操縦者の身長を基準に座席ペダルを配置し, その際の最大踏力を測定して最適配置を解明した. これに対して本研究では, 座席ペダル配置のうち座席位置は, その調整機構によって各操縦者の体型に容易に適合させることができるが, ペダル位置は容易には調整できないので, 各被験者に適合させて全設計要素を自由に変更可能な装置の設計は実質的に困難であることを前提として, 各設計要素を被験者ごとに無段階で設定するのではなく, 段階的に変更させた.

また Pheasant, Harris (1982), Sicat *et al.* (2000b) は, ペダルの向きをトラクタの進行方向の中心線に対し直角方向に配置した. すなわち, このような配置にすると, 踏力は中心線と平行に作用することになる. しかし, ペダルと中心線との距離が大きい場合, 中心線と平行に踏力を作用させるのは不自然であると推察されるので, 本研究では, ペダルを座席基準点を原点とした円弧上に配置し, その法線方向に踏力を作用させた.

材料および方法

1. 設計要素

筆者らはすでに, 事故回避時のブレーキとクラッチの緊急操作を想定し, 操作所要時間を指標として, 座席ペダル配置を検討した (Sicat *et al.* 2000a; Sicat *et al.* 2001). また静的最大踏力と主観的作業強度を指標とした予備的な実験も行った (Sicatら2000b). これらの結果を踏まえて本研究の諸条件を決定した.

本研究では, Fig. 1, Fig. 2 に示すように, 以下の4種類の設計要素を解析した. すなわち, ①座席基準点を原点とし, 進行方向を基準方向としたペダル方向の角度 (以下, ペダル方向角度 X_1 という), ②座席基準点からペダル位置までの水平距離 (以下, 座席ペダル間距離 X_2 という), ③プラットフォームから座席基準点までの鉛直高さ

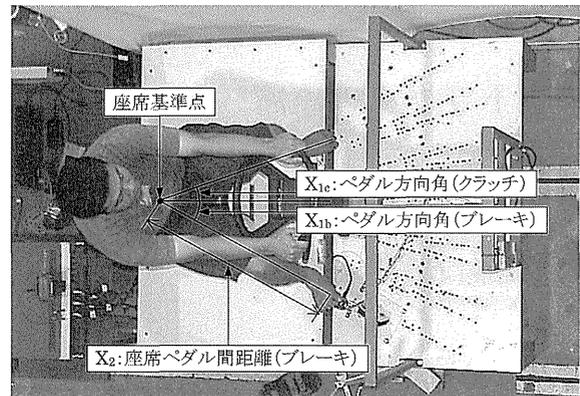


Fig. 1. Pedal offset angle X_1 and seat pedal distance X_2 .



Fig. 2. Seat height X_3 and pad angle X_4 .

(以下, 座席高 X_3 という), ④ペダルパッドの水平方向に対する角度 (以下, パッド角度 X_4 という) である. ここで座席基準点は, 座席の縦方向中央垂直面に対して直角である座席バックレストの最前方点に接する垂線と, 座席のシートパンとの交点とした (Pheasant, Harris 1982).

各設計要素の最適値を同時に決定すると問題が複雑になるので, 1種類ずつ順次検討した. つまり, まず X_2 , X_3 , X_4 を適当な値に固定しておいて X_1 を変化させ最適値を求める. 次に, その X_1 の最適値を用いて X_3 , X_4 を適当な値に固定し, X_2 の最適値を求めるという手順である. 各設計要素の最適値を決定する指標としては静的最大踏力と主観的作業強度を用いた.

2. 実験装置

本研究では静的最大踏力を指標として設計要素を解析するので, 無段階で設計要素を変化させて実験するのは困難である. そのため, これらを段

階的に変更できる運転席模型を、Fig. 1, Fig. 2 に示すように、作製した。運転席模型における各設計要素の設定値は、数種類の市販トラクタの寸法を調査し、その結果をもとに、Table 1 に示すように決定した。

踏力は、ペダルに加えられた3軸方向分力の合力とした。3軸方向分力はそれぞれ、ペダル軸方向分力、上下方向分力、左右方向分力とした。ペダル軸方向分力は、軸に設置したロードセル（ミネベアUMM1-100K-CP）で、Fig. 3 に示すように測定した。ペダルパッド上方分力と側方分力はペダル軸に設置した歪ゲージで測定した。これらセンサからの出力をストレインアンプ（横河電機製作所type 3126）で増幅し、データレコーダ（KEYENCE NR-2000）を介し、解析ソフト（KEYENCE WAVE SHOT! 2000）を用いてコンピュータに記録した。データ記録時のサンプリング周期は10 msとした。なお、ペダルパッドの形状は縦55 mm、横115 mmとした。

主観的作業強度の調査はTable 2 に従った。これは作業の身体的負担度を自覚的に判断するため

のBorgスケールの解釈の部分で、本研究に合わせて若干改良したものである。この場合の主観的作業強度の調査は、例えば、被験者が「やや踏みにくい」と「踏みにくい」の中間程度だと感じた場合は、主観的作業強度は14というふうに行われる。

静的最大踏力、主観的作業強度と合わせて、踏力測定時の作業姿勢も測定した。踏力測定時に作業状態を側方からデジタルカメラ（NIKON COOL PIX 950）で撮影し、後で画像解析ソフト（SigmaScan Pro 5）を用いて、Fig. 4 に示すように、2次元で解析した。後で作業姿勢を解析するために撮影する際には被験者にマーカを付けておいた。マーカを付けた部位は、肩・肘・手首・腕・腰・膝・足首・足小指付根とした。

3. 実験手順

被験者には実験前日は良く睡眠を取り身体の疲労を取っておくようあらかじめ指示した。また靴の種類等による影響を除くため全ての被験者が裸足で実験を行った。

まず初めの X_1 の最適値を求める実験では、そ

Table 1. Position of the parts during the tests

要素	設定値
X_{1b} : ペダル方向角(ブレーキ)	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30°
X_{1c} : ペダル方向角(クラッチ)	0, -5, -10, -15, -20, -25, -30°
X_{2c} : 座席ペダル間距離	600, 700, 800, 900 mm
X_{3c} : 座席高	410, 440, 470 mm
X_{4c} : パッド角	20, 30, 40, 50, 60°

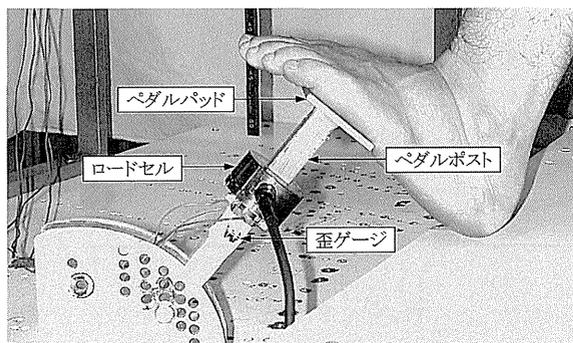


Fig. 3. Equipments for measuring the foot pressing force.



Fig. 4. Analysis of working posture.

他の設計要素の初期値は、市販トラクタの寸法調査をもとにして、 $X_2=700$ mm, $X_3=440$ mm, $X_4=40^\circ$ に固定した。 X_1 の最適値を求めたら、次の X_2 の最適値を求める実験では、先に求めた X_1 の最適値を用いて、他の設計要素はそのまま $X_3=440$ mm, $X_4=40^\circ$ に固定するという手順で順次進めた。

実験前に被験者に与えた指示は以下の通りである。①視線は被験者の目の高さで被験者の前方に設置された印に向ける、②手はステアリングのい

わゆる10時10分の位置を軽く握る、③測定時は手には力を入れず下半身だけを使ってペダルを踏む、④座席の奥に深く腰掛ける。ここで、測定時に手には力を入れないようにしたのは、手に力を入れることで踏力も変わることが予想されたので、ここではその影響を排除し、下半身のみを使って出せる最大踏力を測定しようとしたからである。

踏力の1回当たりの測定時間は60 sとし、この間、出せる最大の力で踏み続けてもらった。測定後は、被験者の疲労回復のために、次の測定までは20分間の休憩を取った。

踏力の測定終了後、前述のTable 2に従って主観的作業強度を測定した。

作業姿勢を解析するための写真は、踏力測定途中の測定開始から10 s, 30 s, 50 sの時点で撮影した。

4. 被験者

被験者は全体で8名であったが、各実験において、Table 3に示すように、随時数名を選抜した。被験者は全員20歳前半の男性の学生で、乗用トラクタによる作業経験はあまり多くない。しかしここでは被験者の出せる静的最大踏力等を測定するのが目的であり、トラクタ作業への習熟度は大きくは影響しないと考えた。また被験者の身長が160~180 cm程度となるように幅をとって選定した。

Table 2. Scale for the rating of perceived exertion

スケール	解釈
6	
7	非常に踏みやすい
8	
9	かなり踏みやすい
10	
11	踏みやすい
12	
13	やや踏みにくい
14	
15	踏みにくい
16	
17	かなり踏みにくい
18	
19	非常に踏みにくい
20	

Table 3. Body specifications of the subjects

被験者	年齢	性	身長 (mm)	体重 (kg)	BKL (mm)	KHS (mm)	FL (mm)	最大踏力 (N)	
								ブレーキ	クラッチ
S ₁	21	男	1605	67.8	527	434	231	517	440
S ₂	24	男	1673	60.6	539	442	246	587	491
S ₃	24	男	1715	61.2	566	476	251	606	480
S ₄	23	男	1701	64.7	547	487	252	571	—
S ₅	23	男	1734	67	612	471	249	509	—
S ₆	23	男	1603	59.9	528	440	237	436	368
S ₇	23	男	1791	62.9	580	495	261	531	803
S ₈	22	男	1824	68.4	614	491	273	468	577

BKL: 座位殿・膝蓋距離

KHS: 座位膝関節高

FL: 足長

5. 解析方法

踏力は60 s間測定したが、開始直後と終了直前の10 s間の測定値は不安定で乱れていたため、この部分の計測値は除外し、測定開始後10～50 s間の平均値を踏力として分析に用いた。また、踏力は被験者の筋力等によって異なり比較が困難なため、被験者ごとの最大踏力を基準として、それに対する比率で踏力を表した。最大踏力は、Table 3に示すように、全測定を通じて得られた最大の踏力とした。

主観的作業強度は前述のTable 2による測定値をそのまま用いた。作業姿勢は、被験者ごとに、最大踏力が出せたときの座席ペダル配置において撮影された写真をもとに調査した。

結果および考察

1. ペダル方向角度

ペダル方向角度の設定値ごとの平均値をFig. 5に示す。横軸にペダル方向角度の設定値を、左縦軸に踏力を最大踏力に対する比率で、右縦軸に主観的作業強度の測定値を示した。なお、本実験における被験者は $S_1 \sim S_3$ の3名、測定条件は、 $X_2 = 700 \text{ mm}$ 、 $X_3 = 440 \text{ mm}$ 、 $X_4 = 40^\circ$ とした。ペダル方向角度はブレーキの場合を正の値、クラッチの場合には向きが異なるので負の値で表した。

まずブレーキの解析結果を踏力で見ると、 $10 \sim 15^\circ$ 程度で最大値を取った。 10° の時の踏力と 15° の時とは大きな差はないが、 10° のほうが若干高い。一方、主観的作業強度で見ると明らかに 15° のほうが低く、つまりより踏みやすいという

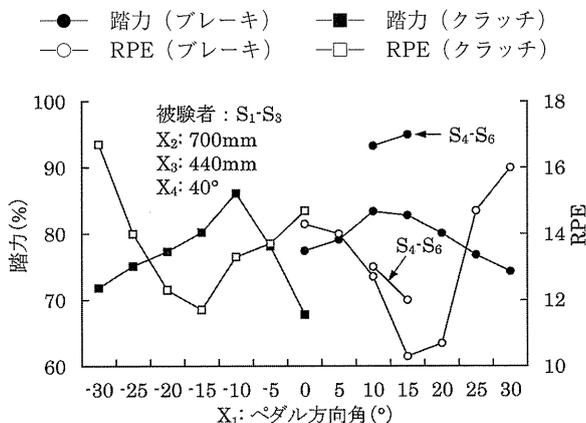


Fig. 5. Relation between the pedal offset angle X_1 , the rating of perceived exertion and the foot pressing force.

結果であった。

ここで、以下の実験を進めるためにペダル方向角度を決定しておく必要があるため、 10° と 15° について被験者を代えて追加実験を行った。追加実験は3名の被験者 $S_4 \sim S_6$ で、各被験者とも各設定値で2回ずつ測定した。その結果、踏力では 15° のほうが高く、主観的作業強度でも 15° のほうがより踏みやすいという結果を示した。これらの結果を総合して、以下の実験は、ブレーキのペダル方向角度は 15° として進めた。

一方、クラッチの解析結果は踏力で見ると -10° で最大値を取り、主観的作業強度で見ると -15° が最も踏みやすかった。二つの結果を総合すると $-10 \sim -15^\circ$ の間に最適値が存在することも予想できるが、本研究ではより客観的な指標として踏力のほうを主観的作業強度よりも優先的に見ることとして、ここでは -10° を最適値と判断して以下の実験を進めた。

本実験では、ペダルを座席基準点を原点とした円弧上に配置し、その法線方向に踏力を作用させた。しかし、踏力を本実験のように作用させた場合と、トラクタの中心線と平行に作用させた場合での、踏力の大きさの違いについてはまだ明らかにされていないので、今後、明らかにすべき課題であると考えられる。

2. 座席ペダル間距離

座席ペダル間距離の実験の結果、ブレーキおよびクラッチともに、被験者の身長で傾向が異なったので、身長ごとに3グループに分けてFig. 6に示した。横軸はグループごとに座席ペダル間距離を取り、左が身長の低いグループ、中央は身長が中程度のグループ、右が身長の高いグループである。なお、本実験における被験者は $S_1 \sim S_3$ 、 $S_7 \sim S_8$ の5名、実験条件は $X_{1b} = 15^\circ$ 、 $X_{1c} = -10^\circ$ 、 $X_3 = 440 \text{ mm}$ 、 $X_4 = 40^\circ$ とした。

全体的に見ると、ブレーキおよびクラッチとも踏力・主観的作業強度のどちらで見ても、グループごとに最適値は同じ値であった。

身長の低いグループは、踏力で見ると最適値は600 mmであるが主観的作業強度で見ると、ブレーキで800 mm、クラッチで700～800 mmが最適であった。このグループだけは踏力による結果と主観的作業強度による結果が異なった。この原因は

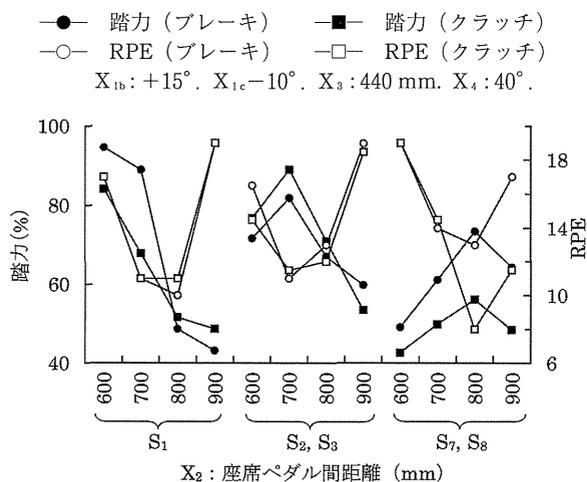


Fig. 6. Relation between the seat pedal distance X_2 , the rating of perceived exertion and the foot pressing force.

特定できないが、被験者が1名だけであることも一因だと考えられる。いずれにしてもここでは踏力のほうを優先的に見て、 S_1 の場合、最適値は600 mmと判断し、以下の実験を進めた。

身長が中程度のグループは踏力・主観的作業強度どちらで見ても700 mmが最適であった。身長が高いグループは同様に800 mmが最適であった。

以上の結果をもとに、グループごとに異なる値を設定し、以下の実験を進めた。

3. 座席高

座席高は被験者の体格にかかわらず同様の傾向を示したので、全被験者の測定値を平均してFig. 7に示した。横軸には座席高を取った。なお、本実験における被験者は $S_1 \sim S_3$ 、 $S_6 \sim S_8$ の6名、実験条件は $X_{1b} = 15^\circ$ 、 $X_{1c} = -10^\circ$ で、 X_2 は S_1 、 S_6 が600 mm、 $S_2 \sim S_3$ が700 mm、 $S_7 \sim S_8$ が800 mm、 $X_4 = 40^\circ$ とした。

踏力・主観的作業強度どちらで見ても最適値は410 mmであった。ただし一般的には、ペダル高さが座席面と同一水準にある時に踏力は最大値を取り、ペダル高さが低くなるにつれて踏力も減少する傾向がある(酒井 1979)ので、410 mmより低い値に最適値があることも考えられる。

本実験では最適値は410 mmと判断し、以下の実験を進めた。

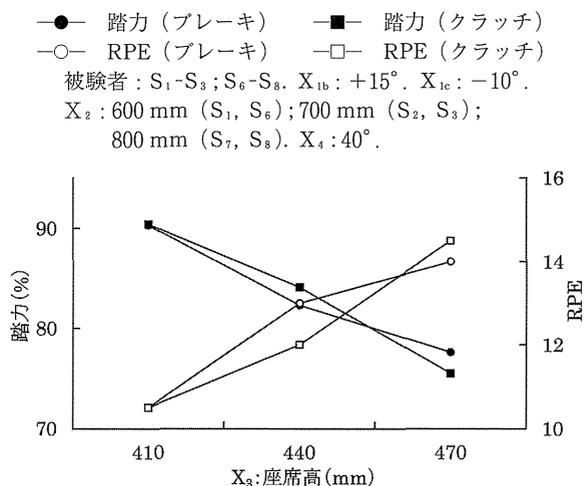


Fig. 7. Relation between the seat height X_3 , the rating of perceived exertion and the foot pressing force.

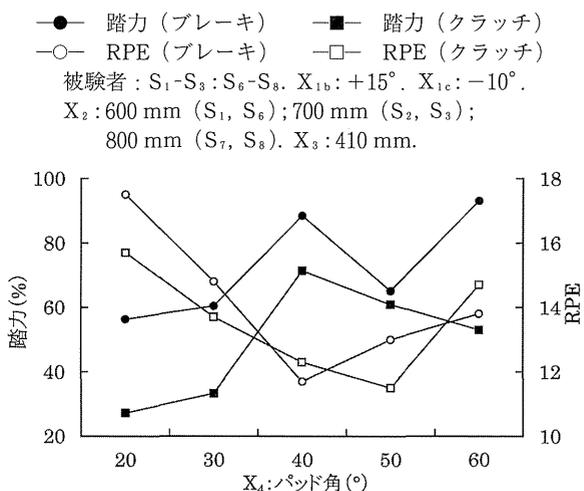


Fig. 8. Relation between the pad angle X_4 , the rating of perceived exertion and the foot pressing force.

4. パッド角度

パッド角度も被験者の体格にかかわらず同様の傾向を示したので、全被験者の測定値を平均してFig. 8に示した。横軸にはパッド角度を取った。なお、本実験における被験者は $S_1 \sim S_3$ 、 $S_6 \sim S_8$ の6名、実験条件は $X_{1b} = 15^\circ$ 、 $X_{1c} = -10^\circ$ 、 X_2 は S_1 、 S_6 が600 mm、 $S_2 \sim S_3$ が700 mm、 $S_7 \sim S_8$ が800 mm、 $X_3 = 410$ mmとした。

ブレーキの解析結果を踏力で見ると、全体的には40~60°が適切だと考えられるが、50°の時だけが低い値を示した。この原因は、ここでは特定できなかったが、被験者数が多くないことや、測定時の何らかの不具合も考えられる。主観的作業強度で見ると40°が最適であった。

Table 4. Angle of waist, knee and ankle when the foot pressing force is the maximum

部位		平均角度 (°)	標準偏差 (°)
腰	ブレーキ	96.9	6.3
	クラッチ	94.3	6.9
膝	ブレーキ	125.6	9.3
	クラッチ	127.7	8.6
足首	ブレーキ	68.0	7.8
	クラッチ	76.2	11.0

被験者 : S₁-S₃ : S₆-S₈

一方、クラッチの解析を踏力で見ると最適値は40°で、主観的作業強度で見ると50°であった。

5. 作業姿勢

作業姿勢は、全被験者の測定値を平均してTable 4に示した。各部位の最適値はブレーキおよびクラッチともに腰95°、膝125°、足首70°程度であった。

一般には踏力の最大値が得られるのは、ペダルの高さが座面と同一高さで、膝角が大きい場合である(酒井 1979)。今回の実験は、ペダルを座面と同一高さに配置する条件はなく、膝角は60~160°程度の範囲での測定ではあったが、最大踏力が出た際の膝角は125°となった。

要約

乗用トラクタの座席ペダル配置について、運転席模型を用い踏力を指標として解析した。あわせて主観的作業強度と作業姿勢を測定した。その結果、以下のことが明らかになった。1) 各設計要素の最適値は、ペダル方向角度がブレーキ10°、クラッチ15°、座席ペダル間距離は身長が低い場合600 mm、身長が中程度の場合700 mm、身長が高い場合800 mm、座席高は410 mm、パッド角度は40~60°であった。2) 踏力を指標とした場合の設計要素の最適値と主観的作業強度を指標とした場合の最適値は一致する傾向があった。3) 最大踏力が出た際の身体各部位の角度はブレーキおよびクラッチともに腰95°、膝125°、足首70°程度であった。

キーワード : 作業姿勢, 座席ペダル配置, 主観的作業強度, 乗用トラクタ, 静的最大踏力

引用文献

- Hertzberg, H. T. E., Burke, F. E. (1971) Foot forces exerted at various aircraft brake-pedal angles. *Human factors* **13**(5), 445-456.
- Lara-Lopez, A., Aguilera-Cortes, L. A., Barbosa-Castillo, F. (1999) Measurement of forces applied to handgrips and pedals for a sample population of Mexican males. *Applied ergonomics* **30**, 173-176.
- Mortimer, R. G. (1974) Foot brake pedal capability of drivers. *Ergonomics* **17**(4); 509-513.
- Pheasant, S. T., Harris, C. M. (1982) Human strength in the operation of tractor pedals. *Ergonomics* **25**(1), 53-63.
- 酒井 学 (1979) 足踏ペダル操作に関するエルゴノミクス的研究の現状. *農業機械学会誌* **41**(3), 479-482.
- Sicat, J. C. V., Mitarai, M., Kinoshita, O. (2000a) Ergonomic design of 4-wheel tractor brake/clutch pedals. - Analysis of seat heights and pedal positions -. *Proceedings of 59th annual meeting of JSAM*, 495-496.
- Sicat, J. C. V., Mitarai, M., Kinoshita, O. (2000b) Development of 4-wheel tractor brake and clutch pedal designs through ergonomic analysis of seat heights and pedal positions. *ASAE Annual international meeting*, Paper No. 007002.
- Sicat, J. C. V., Mitarai, M., Kinoshita, O., Kida, H. (2001) Ergonomic design of 4-wheel tractor (Part 1). - Analysis of seat and pedal positions -. *Journal of JSAM* **63**(6), 51-56.
- Yadav, R., Tewari, V. K. (1998) Tractor operator workspace design. - a review. *Journal of Terramechanics* **35**, 41- 53.