

2輪駆動トラクタのけん引効率予測*

大友功一*¹・岸本 正*¹

要 旨

トラクタのけん引性能を評価するための一つの方法として、2輪駆動トラクタのけん引効率の予測を行なった。予測精度を検討するために、トラクタの機体条件ならびに平均円すい指数からけん引効率等を予測すると共に、土壌密度を変えた圃場でけん引性能試験を行ない実測データを収集した。けん引力およびけん引効率の実測値の予測値に対する偏差と予測最大値との比を偏差率として定義し求め、予測精度を検討した。その結果、全データの偏差率の平均値は、けん引力で0.07%、けん引効率で-0.29%となり、提案モデルは高い精度で予測できることを示した。

[キーワード] トラクタ, けん引力, けん引効率, 円すい指数, 予測モデル

Tractive Efficiency Prediction for a Two Wheel Drive Tractor*

Koichi OHTOMO*¹, Tadashi KISHIMOTO*¹

Abstract

A prediction of the tractive efficiency of a two-wheel drive tractor was conducted with tractor dimensions and average cone indexes. Experimental data in a field for the discussion of the prediction accuracy were obtained through tractor drawbar pull tests. The deviations of the measured data to the predicted one of drawbar pull and tractive efficiency were calculated, and the deviation rates which were defined as the ratio of the deviation to the predicted maximums of the drawbar pull and the tractive efficiency were obtained. The mean deviation rate of the drawbar pull and the tractive efficiency were 0.07% and -0.29% respectively. This reveals that reliable predictions for the tractive performance become possible.

[Keywords] tractor, drawbar pull, tractive efficiency, cone index, prediction model

I 緒 言

トラクタの駆動輪は土壌などに直接作用し、軸トルクはトラクタを前進させる推進力に変換され

る。このとき転がり抵抗も同時に発生し、推進力の一部を消費する。エネルギーの効率的利用から、推進力の増大あるいは転がり抵抗の減少など駆動輪の変換効率に関する研究は今後も重要である。

研究の成果として走行装置の改良に成功したときなど、その性能を評価できることが望まれる。特に、土壌に関するトラクタのけん引性能を共通の基準で評価できるシステムが確立されれば、農

* 1994年4月第53回農業機械学会年次大会にて一部講演
*¹ 会員, 帯広畜産大学畜産学部 (〒080-8555 北海道帯広市稲田町 TEL 0155-49-5521) Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine, Obihiro-shi, 080-8555 Japan

業機械が世界的に流通している中で、これを基準としてトラクタの性能評価が可能になると考えられる。

トラクタの性能評価に関連して、旧 NIAE では多数の駆動輪用タイヤに関して、平均円すい指数を土壤条件とし5種類の土壤について、けん引性能を公表している¹⁾。しかし、NIAE データに記載されているタイヤは参照可能であるが、すべてのタイヤサイズについてデータを網羅しているわけではないので、タイヤサイズが一致しない場合にデータから推定しなければならない。高い信頼性を持ってけん引性能を推定するためには、けん引性能予測モデルを整備する方法が考えられる。この観点から、これまでに筆者らは駆動輪のけん引力予測モデルを提案し、この NIAE データを用いて予測を行ない良好な結果を得た²⁾。また、2輪駆動トラクタでけん引性能試験を行ない、その実測データとこのモデルで予測したけん引力とを比較したところ良好な結果を得ることができ、国内のデータでもモデルの有効性を実証し速報した³⁾。

本研究では速報にて発表した2輪駆動トラクタのけん引力予測モデル³⁾を拡張し、推進力、転がり抵抗、けん引力、軸トルクに加えてけん引効率の予測を行なった。さらにこのモデルを用いて予測を行ない圃場実験で得られたデータと比較し、その精度について検討した。圃場けん引性能の予測にはトラクタ機体条件および土壤条件をモデルに入力するが、土壤条件には NIAE データと同様に平均円すい指数を用いる。またモデルの適用条件は、土壤については走行部に沈下を伴うこと、各タイヤが接地荷重に適合した空気圧に設定されているなど仕様どおりに使用されていることを前提としている。

II トラクタけん引性能予測モデル

けん引効率はけん引力、駆動輪軸トルク、滑り率から計算される。まず、けん引効率の計算式を示し、その後けん引力などのモデルを示す。

トラクタに作用する外力を図1に示す。図中の W は車輪荷重に対する土壤反力を示す。しかし、トラクタ実機の各タイヤでの土壤反力の測定はかなり困難であるので、計算にはトラクタ前後各車輪で測定した各車輪の静荷重を用いた。従って式

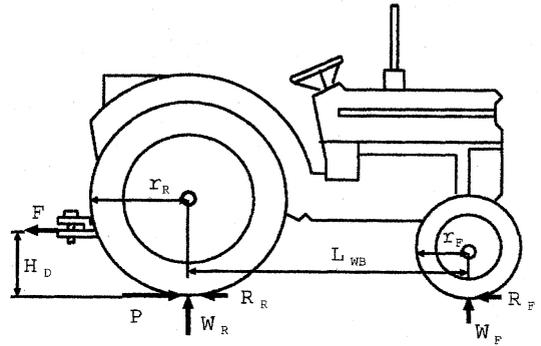


図1 トラクタに作用する外力
Fig. 1 External forces acting on a tractor

中の W の説明は「荷重」で表現する。以下、式中の記号の添字 F は前輪、 R は後輪を表す。また、荷重 W の添字 S は静荷重、 D はトラクタに重量転移が発生したときの動荷重を表す。なお、動荷重の計算式は「IV予測方法」で示す。

1. けん引効率予測モデル

2輪駆動トラクタのけん引効率の予測には次式を用いた。

$$E_T = \frac{F \cdot r_R (1 - S)}{T} \quad (1)$$

ここに、

E_T : けん引効率 [-]

F : けん引力 [kN]

r_R : 後輪半径 [m]

S : 圃場滑り率 [-]

T : 軸トルク [kN・m]

自走時の駆動輪では転がり抵抗に打ち勝って前進するため、実際に既に滑りが発生していると考えられる。そこで、式中の圃場滑り率 S はけん引出力を算出するときに必要な速度と対応させ、無負荷走行すなわち自走時の滑り率を零と定義した。したがって推進力モデルの滑り率 I と区別して用いる。本研究では特に断らない限り、後者の滑り率 I を指す。

2. けん引力予測モデル³⁾

推進力、転がり抵抗からけん引力を予測するモデルの共通項に車両走行装置に関する変数より求めた車輪指数 (wheel index)⁴⁾をまず定義した。この指数は、けん引性能を表現するための車輪条件とも定義される。

$$C_N = \frac{0.102 W_S}{b \sqrt{2r}} \quad (2)$$

ここに、

C_N : 車輪指数 [kPa]

W_S : 車輪静荷重 [kN]

b : 車輪幅 [m]

r : 車輪半径 [m]

なお係数 0.102 は $[m^{-0.5}]$ の単位を持つ。

けん引効率予測に必要なけん引力、軸トルクのモデルを次に示す。けん引力は、推進力から前輪と後輪の転がり抵抗を引いて求め、それは次の関係にある。

$$F = P - R_F - R_R \quad (3)$$

ここに、

P : 推進力 [kN]

R_F : 前輪転がり抵抗 [kN]

R_R : 後輪転がり抵抗 [kN]

推進力モデルを次に示す。この式はウィズマラによって導かれた予測式⁵⁾に車輪指数を導入し改良したものである。なお CI には平均円すい指数を用いる。

$$P = 0.75 W_{DR} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{0.102 CI}{C_N} + 5\right) I} \right\} \quad (4)$$

ここに、

W_{DR} : 後輪動荷重 [kN]

CI : 平均円すい指数 [kPa]

I : 滑り (小数表示) [—]

軸トルクは次式により計算する。

$$T = P \cdot r_R \quad (5)$$

次に転がり抵抗のモデルを示す。モデルを検討する圃場は極端な粘性あるいは砂のような流動性がほとんどないので、転がり抵抗の発生は車輪の沈下を主原因とした。また、駆動輪の転がり抵抗は、滑りの発生と共に車輪の沈下量は増大するが、転がり抵抗それ自体の条件、主として荷重が変わらない限り、他の研究者⁵⁾と同様、変化しないと考えた。即ちけん引力を発生している駆動輪の転がり抵抗には、そのときの荷重で被けん引自由転動状態の転がり抵抗を予測し、それを充てる。前輪および後輪の転がり抵抗予測値の計算は、まず(6)式で自由転動時の沈下量を予測し、その値を用いて行なう。なお、(6)式は車輪指数と円すい指数を変数として得られた実験式⁴⁾である。

$$Z_0 = \frac{4.9 C_N}{CI} \quad (6)$$

ここに、

Z_0 : 車輪沈下量 [m]

次に予測沈下量から転がり抵抗値を次式で予測する⁶⁾。なお各モデルの荷重は自走あるいは作業時に発生する重量転移と静荷重を合算した荷重で計算を進める。

$$R = K W_D \sqrt{\frac{Z_0}{2r}} \quad (7)$$

ただし、

$$K = 0.62 + 8 \times 10^{-5} CI$$

また、

R : 転がり抵抗 [kN]

W_D : 車輪動荷重 [kN]

既に述べたように(4)式で提案したモデルでは土壌条件として平均円すい指数を用い、圃場で計測した円すい指数を前輪および後輪用にそれぞれ特定の深さで平均する。すなわち、平均円すい指数計算深さは各車輪の車輪指数を変数とする次の実験式⁴⁾で算出する。

$$D_{CI} = 0.03 C_N + 0.12 \quad (8)$$

ここに、

D_{CI} : 平均円すい指数計算深さ [m]

III 実験装置および方法

1. 実験装置

2輪駆動トラクタに KUBOTA ST22 を供試した。けん引力の計測はロードセル、駆動輪軸トルクは車輪ハブと車輪との間に装着するトルクメータを試作供試して測定した。駆動輪の回転速度は、車軸に装着した8個の突起が付いた円盤でスイッチを断続することで出力電圧を変化させ、その間隔から回転角度を検出すると共に、回転に要した時間を測定しこれらから算出した。またトラクタの速度は第5輪を装着し、その回転速度から算出した。供試トラクタの主要諸元を表1に示す。

2. 実験方法

(1) 土壌調製

実験に供試した圃場は火山灰土で国際土壌学会法による分類では砂質粘土である。プラウおよびロータリにより耕起・碎土した後にローラで転圧

表1 供試トラクタの主要諸元
Table 1 Specifications of tested tractor

軸距 (mm)		1,653
輪距 (mm)	前輪	1,290
	後輪	1,371
軸荷重 (kN)	前輪	4.53
	後輪	7.28
車輪半径 (mm)	前輪	276
	後輪	495
車輪幅 (mm)	前輪	108
	後輪	230
空気圧 (kPa)	前輪	176
	後輪	118
ヒッチ高 (mm)		460

表2 土壌条件
Table 2 Soil conditions

Test No.	CI MPa	DD t/m ³	WD %
1	0.15	1.19	33.1
2	0.20	1.17	33.0
3	0.30	1.16	31.2
4	0.56	1.50	34.2
5	0.68	1.45	33.3
6	1.08	1.38	32.4

DD: soil density dried
WD: water content

し、転圧回数を変えることで合計6通りの土壌密度を得た。

土壌密度、土壌水分およびモデルに入力した供試駆動車輪用の平均円すい指数を表2に示す。供試した円すい形状は、ASAE S313.2⁷⁾の大きいものに相当する。各調製土壌につき合計5ヶ所で計測し、その平均値を示した。

(2) けん引性能試験

トラクタの最大出力が発生可能なフルスロットルでの実験とした。けん引棒にけん引力計を掛け、ワイヤで背後から水平負荷を掛けるトラクタ・トレーストラクタの実験法とし、データ収集は滑り率制御として、滑り率を5-70%の範囲で変えてけん引測定を繰り返した。

IV 予測方法

けん引効率の予測は次の順序で進める。

- ① 予測重量転移を含む動荷重、平均円すい指数などから供試トラクタの駆動輪軸トルクを予測
- ② 駆動輪軸トルク、駆動輪半径などからけん引力を予測
- ③ 圃場滑り率、けん引力、駆動輪軸トルクなど

からけん引効率を予測

1. 重量転移の処理

トラクタではけん引作業時、けん引抵抗の発生により重量転移が発生する。重量転移を考慮した前、後輪の動荷重計算式を次に示す。水平けん引の場合は、前輪荷重の一部が後輪に等量転移するとして計算する。

$$W_{DF} = W_{SF} - \frac{T - F(r_R - H_D) - R_{DF}(r_R - r_F)}{L_{WB}} \quad (9)$$

$$W_{DR} = W_{SR} + \frac{T - F(r_R - H_D) - R_{DF}(r_R - r_F)}{L_{WB}} \quad (10)$$

ここに、

W_{DF} : 前輪動荷重 [kN]

W_{SF} : 前輪静荷重 [kN]

W_{SR} : 後輪静荷重 [kN]

R_{DF} : 重量転移発生時の前輪転がり抵抗 [kN]

R_{DR} : 重量転移発生時の後輪転がり抵抗 [kN]

H_D : けん引棒高さ [m]

L_{WB} : 軸距 [m]

r_F : 前輪半径 [m]

2. けん引力の計算法

けん引力予測値の計算はオイラー法を用いた。提案したモデルの微分あるいは偏微分式を求め、それから微小滑り率0.1%に対する荷重、軸トルク、推進力、前輪および後輪転がり抵抗、けん引力などの要素増分を計算する。滑り率0%からこれらの要素増分を積分し、100%迄計算を進める。微小滑り率と各けん引性能要素間の関係をブロック線図として図2に示す。またこの関係は(11)式に示す行列で表わされる。

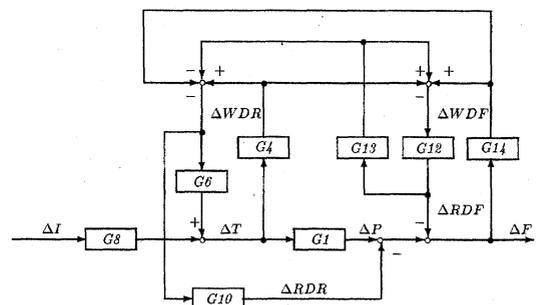


図2 微小滑り率に対する各要素増分のブロック線図
Fig.2 Increment block diagram of tractive performance for small slip ΔI

$$AB=C \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} -G6/G8 & 1/G8 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -G4 & 0 & G13 & G14 \\ -G10 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & G4G12 & 0 & 1-G12G13 & -G12G14 \\ 0 & -G1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \Delta W_{DR} \\ \Delta T \\ \Delta R_{DR} \\ \Delta R_{DF} \\ \Delta F \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \Delta I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

けん引増分が計算される過程は、まず微小滑り率の増分と駆動輪の荷重増分から、軸トルク増分が求まる。求めた軸トルクから推進力増分が計算され、前、後輪の重量転移を考慮した車輪荷重から計算される転がり抵抗を引くことでけん引増分が計算される。

線図のG1からG14は偏微分係数および微分係数（以下、微分係数）を示し、それらは既に述べたように次の微分あるいは偏微分式から計算される。なお(11)式では前輪の荷重増分を直接計算していないが、既に述べたように転移量の絶対値は前、後輪とも同じであり、前輪荷重の減少分は後輪荷重の増加分として処理した。

$$G1 = \frac{dP}{dT} = \frac{1}{r_R} \quad (12)$$

$$G4 = \frac{\partial W_{DR}}{\partial T} = \frac{1}{L_{WB}} \quad (13)$$

$$G6 = \frac{\partial T}{\partial W_{DR}} = 0.75r_R \{1 - e^{-\left(\frac{0.102CI}{C_N} + 5\right)I}\} \quad (14)$$

$$G8 = \frac{\partial T}{\partial I} = 0.75r_R W_{DR} \left(\frac{0.102CI}{C_N} + 5\right) e^{-\left(\frac{0.102CI}{C_N} + 5\right)I} \quad (15)$$

$$G10 = \frac{dR_{DR}}{dW_{DR}} = 1.5K \sqrt{\frac{5}{K_F}} \left(\frac{W_{DR}}{2}\right)^{1.5} \quad (16)$$

ここに、

$$K_R = CI \cdot b_R (2r_R)^{1.5} \quad (17)$$

$$G12 = \frac{dR_{DF}}{dW_{DF}} = 1.5K \sqrt{\frac{5}{K_F}} \left(\frac{W_{DF}}{2}\right)^{1.5} \quad (18)$$

ここに、

$$K_F = CI \cdot b_F (2r_F)^{1.5} \quad (19)$$

$$G13 = \frac{\partial W_{DF}}{\partial R_{DF}} = \frac{r_R - r_F}{L_{WB}} \quad (20)$$

$$G14 = \frac{\partial W_{DR}}{\partial F} = \frac{H_D - r_R}{L_{WB}} \quad (21)$$

(11)式によるけん引等計算は次のように行なった。トラクタが転がり抵抗に打ち勝って自走に至るまでの過程では、けん引力の値はゼロである。実際にはけん引力に起因する重量転移がないのに対して、(11)式は負のけん引力の値を算出するので、その結果本来発生しない重量転移が計算される。整合性をとるために計算開始時にG14を0と固定して滑り率0から計算を始める。以下に述べる(26)、(27)および(29)式を(3)式に代入して計算したけん引力Fが、負から0あるいは正の値になった時点で自走を開始したものととして、符合変化の確認と共に0固定を解除しG14に微分係数を入力して計算を進める。

滑りの微小増分ΔIは既に述べたように0.001とし、計算回数Nが1,000になるまで予測計算を行なう。そのときの滑り率Iは次式で表わされる。

$$I = \sum_0^N \Delta I \quad (22)$$

自走に至るまでの計算が進み既に述べたように、 $F \geq 0$ となった時点で $I_0 = I$ とおき、圃場滑り率は次式で計算した。

$$S = \frac{I - I_0}{1 - I_0} \quad (23)$$

また前、後輪の動荷重、転がり抵抗、駆動輪軸トルクは次の増分積算式で求めた。

$$W_{DF} = W_{SF} - \sum_0^N \Delta W_{DR} \quad (24)$$

$$W_{DR} = W_{SR} + \sum_0^N \Delta W_{DR} \quad (25)$$

$$R_{DF} = R_{SF} - \sum_0^N \Delta R_{DF} \quad (26)$$

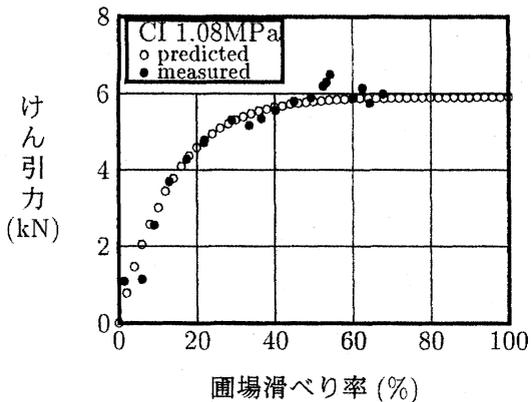
$$R_{DR} = R_{SR} + \sum_0^N \Delta R_{DR} \quad (27)$$

V 結果および考察

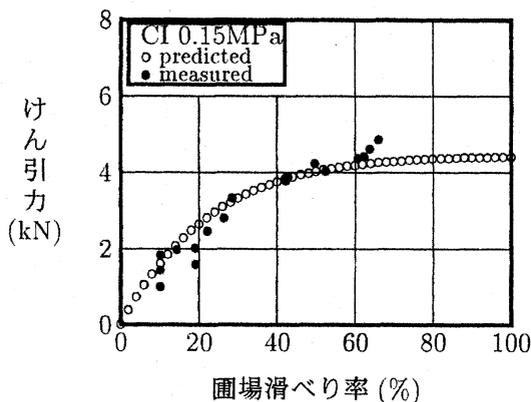
1. けん引力予測

図3に平均円すい指数が最大の1.08MPa, 最小の0.15MPaでの実測および予測けん引力を示す。滑り率が50%より大きい部分では実測値が予測値より大きくなる点があるが, 予測値は実験から得られた実測値の傾向をよく表わしている。土壌調製には十分に注意を払ったが圃場での実機によるけん引性能試験であるので, 圃場内での土壌状態の違いによるデータのばらつきは避けられないと考える。図3で示した程度のデータのばらつきは通常観測され他の4結果についても同様であった。

次に予測値の精度を検討する。予測けん引力に対する実測けん引力を変動として, まず予測値からの偏差を求めた。この偏差の平均値が零に近ければそれだけ予測精度がよいことを意味する。その結果は0.012kNと極めて小さな値で, 予測精度は高いといえる。さらに計器の許容誤差表示法を準用し, 偏差と予測最大値との比を偏差率として求め, 圃場滑り率に対するけん引効率先測値の偏差率として一括して図4に示す。偏差率0%を中心としたデータのばらつきがあるが, 同図に示すように決定係数は0.03となり, 偏差率と圃場滑り率との間には相関がみられなかった。そこで偏差率の平均値を求めたところ, 0.07%と極めて小さ



a) 円すい指数 1.08MPa の予測結果
a) Prediction of drawbar pull in the case of 1.08MPa cone index



b) 円すい指数 0.15MPa の予測結果
b) Prediction of drawbar pull in the case of 0.15MPa cone index

図3 実測けん引力と予測けん引力との対比
Fig.3 Comparison of the measured drawbar pull with the predicted drawbar pull

$$T = \sum_0^N \Delta T \tag{28}$$

なお本報においては, (4)式で示した推進力モデルを用いて最初にトルクを計算し, 重量転移を求めた後で車輪動荷重や転がり抵抗を計算する。最終的には(3)式に示したように, 推進力から前後輪の転がり抵抗を引いてけん引力を求める。従って, けん引力を求めるために必要な推進力はブロック線図における計算の都合上, (29)式で示すように軸トルクを駆動輪半径で除して算出した。

$$P = \frac{T}{r_R} \tag{29}$$

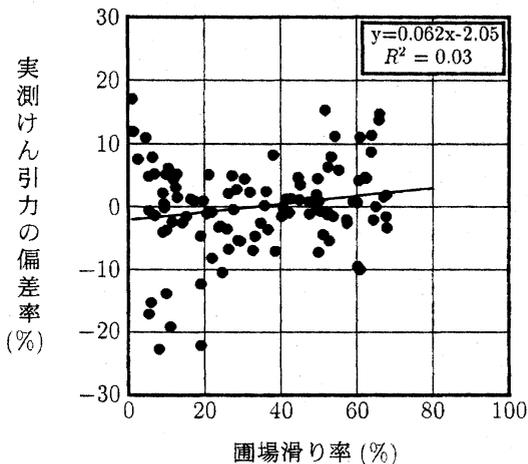
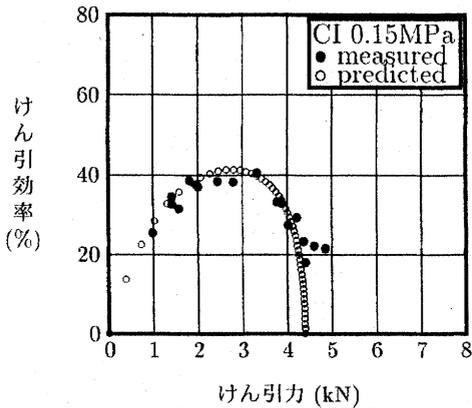
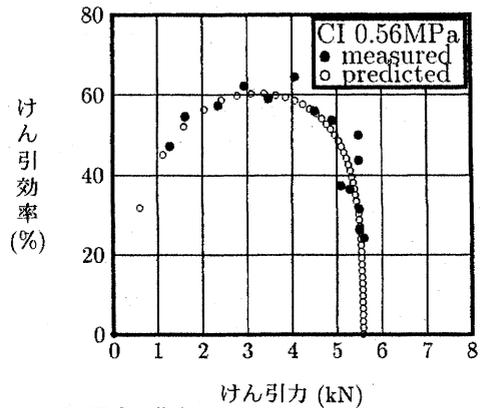


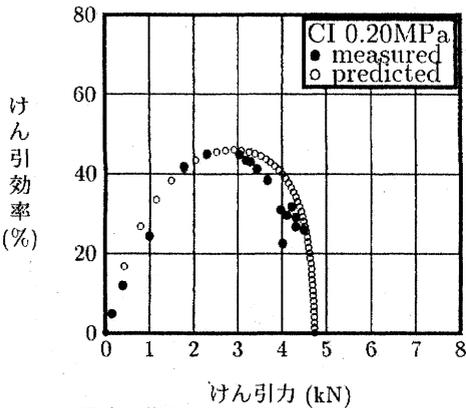
図4 滑り率に対する実測けん引力の偏差率
Fig.4 Relationship between the slip and the deviation rate of the measured data



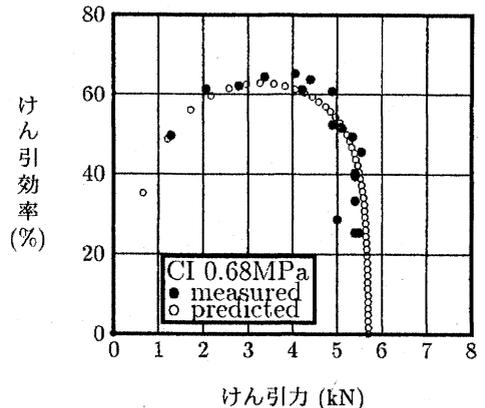
a) 円すい指数 0.15MPa での予測結果
a) Prediction of tractive efficiency in the case of 0.15MPa cone index



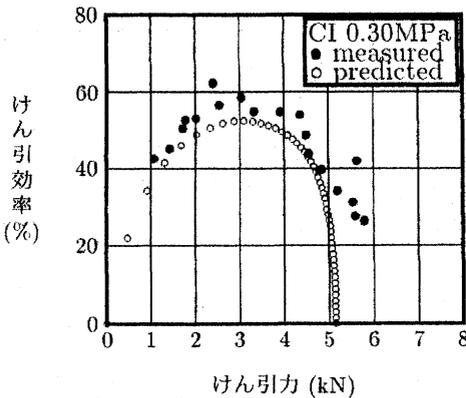
d) 円すい指数 0.56MPa での予測結果
d) Prediction of tractive efficiency in the case of 0.56MPa cone index



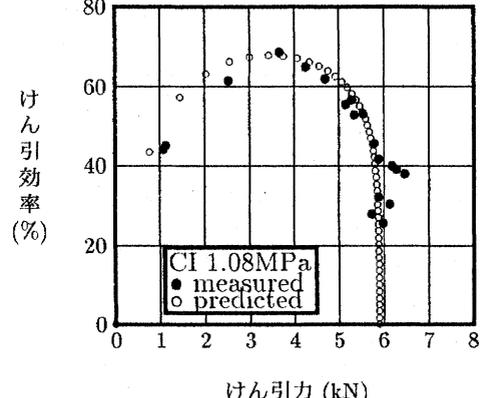
b) 円すい指数 0.20MPa での予測結果
b) Prediction of tractive efficiency in the case of 0.20MPa cone index



e) 円すい指数 0.68MPa での予測結果
e) Prediction of tractive efficiency in the case of 0.68MPa cone index



c) 円すい指数 0.30MPa での予測結果
c) Prediction of tractive efficiency in the case of 0.30MPa cone index



f) 円すい指数 1.08MPa での予測結果
f) Prediction of tractive efficiency in the case of 1.08MPa cone index

図 5 実測けん引効率と予測けん引効率との対比

Fig.5 Comparison of the measured tractive efficiency with the predicted tractive efficiency

な値を示し、精密さの指標としての標準偏差は7.41%であった。

2. けん引効率予測

図5a)からf)にけん引効率の予測結果を示す。予測モデルはけん引力に対するけん引効率の分布が上に凸となる特徴をよく捉えている。次に予測精度を検討する。圃場滑り率から予測したけん引効率に実測けん引効率を対比させ図6に示す。けん引効率の予測値と実測値が、直線 $y=x$ 上にあれば予測誤差が零であることを示す。回帰の結果、決定係数は0.68で相関が認められた。回帰係数は0.92であり、モデルはかなり正確に予測している。また、けん引効率に関して「1. けん引力予測」で示した偏差率を求め、けん引力に対するけん引効率実測値の偏差率として図7に示す。偏差率の平均値は-0.29%として求められ、精密さの指標としての標準偏差は13.9%であった。

VI まとめ

エネルギーの効率的利用の研究にあたり、トラクタのけん引性能を評価するための一つの方法として、2輪駆動トラクタのけん引効率予測モデルを提案した。トラクタの機体条件としての車輪幅や半径等、また土壌条件としての平均円すい指数からけん引効率等を予測すると共に、土壌密度を変えた圃場でけん引性能試験を行ないその精度を検討した。検討法は、この研究の趣旨からモデルを基準として、予測値に対する実測値の精度を解析する方法とした。モデルに入力する土壌条件は平均円すい指数のみであるが、ばらつきを伴いながらも偏差率が0%に近い値となり、現在のところモデルに修正の必要がないほどの高い精度であった。今後、異なる種類の土壌での予測実験を行ない、このモデルの適用条件の整備等を検討中である。

記号

b, b_F, b_R : 車輪幅 [m]

CI : 平均円すい指数 [kPa]

C_N : 車輪指数 [kPa]

D_{CI} : 平均円すい指数計算深さ [m]

E_T : けん引効率 [-]

F : けん引力 [kN]

H_D : けん引棒高さ [m]

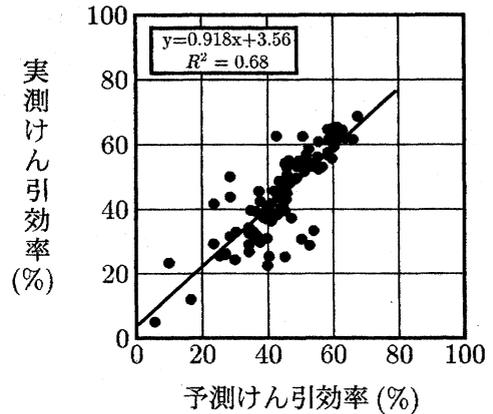


図6 実測けん引効率と予測けん引効率との関係
Fig. 6 Relationship between the measured tractive efficiency and the predicted tractive efficiency

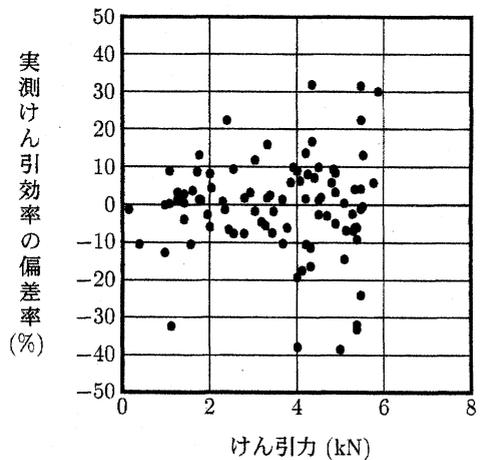


図7 けん引力に対する実測けん引効率の偏差率
Fig. 7 Relationship between the drawbar pull and the deviation rate of the measured data

I : 滑り (小数表示) [-]

L_{WB} : 軸距 [m]

P : 推進力 [kN]

R, R_F, R_R : 転がり抵抗 [kN]

R_{DF}, R_{DR} : 重量転移時の転がり抵抗 [kN]

r, r_F, r_R : 車輪半径 [m]

S : 圃場滑り率 [-]

T : 軸トルク [kN・m]

W_D, W_{DF}, W_{DR} : 車輪動荷重 [kN]

W_S, W_{SF}, W_{SR} : 車輪静荷重 [kN]

Z_0 : 車輪沈下量 [m]

参 考 文 献

- 1) Dwyer, M.J., Evernden, D.W., McAllister, M. : Handbook of Agricultural Tyre Performance (Second Edition), Report No. 18, National Institute of Agricultural Engineering Wrest Park, Silsoe, Bedfords, MK45 4HS, 1976
- 2) 大友功一, 岸本 正, 谷口哲司 : 駆動輪のけん引性能予測に関する研究, 一旧 NIAE データに対するモデルの予測結果一, 第 53 回農業機械学会年次大会講演要旨, 19-20, 1994
- 3) Koh-ichi Ohtomo, Tadashi Kishimoto, Tetsuji Taniguchi : Verification of a Tractive Performance Prediction Model, Proceedings of the 12th International Conference of the ISTVS, 130-137, 1996
- 4) 大友功一 : 農用地における車輪の転がり抵抗予測に関する研究, 北海道大学博士論文, 1986
- 5) Wismer, R.D., Luth, H.J. : Off-road Traction Prediction for Wheeled Vehicles, ASAE Paper No. 72-619, St. Joseph, MI 49085, 1984
- 6) 大友功一, 小野哲也, 谷口哲司 : トラクタのけん引特性に関する研究 (第 4 報) - 自由転動剛体車輪の走行抵抗 -, 農機北支報, 23, 77-83, 1982
- 7) ASAE Standard : ASAE S313.2 "Soil Cone Penetrometer", ASAE STANDARD 1997, 821-822, 1997
(原稿受理 : 1999 年 1 月 14 日・質問期限 : 2000 年 5 月 31 日)