

解説

トラクタのけん引性能と土の力学性

田 中 孝*

1. まえがき

トラクタのけん引性能に関する研究は非常に古くから行なわれ、多くの報告がある。しかし、トラクタのけん引性能の最終的な決定要因とも考えられるべき地表あるいは土壌条件との関係についてはほとんど研究されていない。土のもつ性質の複雑さ、不均一性、幅の大きい変化性などによるものであらうと考えられる。これはトラクタのけん引性能という問題だけに限らず、耕うん機械あるいは建設機械など土を対象とする機械すべてについて言えることである。

土木工学の分野においてはかなり古くから土を力学的な対象として取り扱ってきたが、この分野における土は機械と土との関係とちがってかなり大きな mass として取り扱われることが多く、土壌構造全体の動きとでもいえるような大きい範囲における非常に変化速度のおそい静荷重下での問題であり、時には土を弾性体と見なし得る場合があるが、機械の場合、そのようなことは考えられず、地表のごく浅い層における動的で早い作用速度による変形の大きい問題である。このようなちがいが、土木工学で発展してきた力学的概念を機械と土との関係に導入し得なかった大きな理由の一つと考えられる。もちろん、機械と土の間における作用や力の関係がはっきりしなかったことも大きな理由であるが、このような機械と土との関係についての研究が体系的に始められたのはごく最近であり、Soil Dynamics ともいわれ、また車両に関する分野では Terramechanics ともいわれている。

2. トラクタのけん引性能と土壌条件

トラクタのけん引性能はその重量、走行装置、タイヤ空気圧などのトラクタの構造や形状と同時に地表の状況によって大きく影響される。けん引力は一般に、トラクタの走行部が土に働きかけた力の反作用である前進力 H とそれを妨げようとするところがり抵抗 R の差として得られ、普通すべり率との関係で示される。

図-1³⁾ は一般的なけん引力-すべり率曲線で、けん引抵抗を増加するにしたがってすべり率は大きくなり、

最終的には前進不能になる。けん引力は図のようにトラクタ重量に影響されるため、単位重量当りのけん引力をもってけん引係数を用いるが、図-2²⁾ はけん引係数で

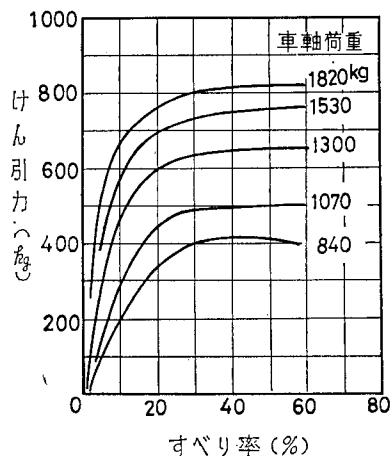


図-1 けん引力とすべり率の関係

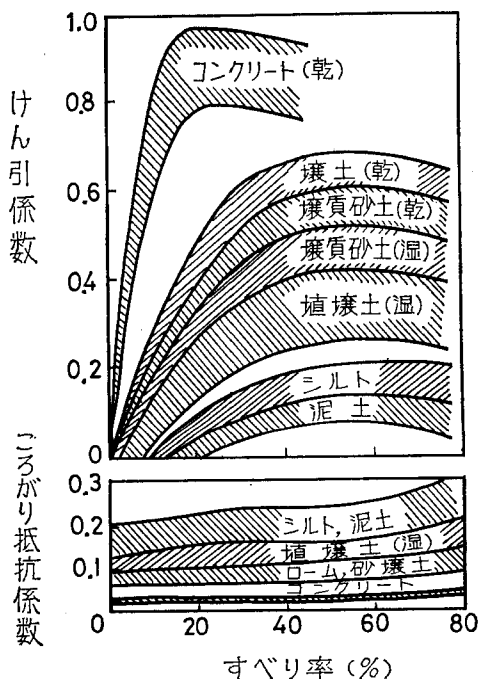


図-2 種々の土壌におけるけん引係数とところがり抵抗係数

* 鳥取大学農学部 1971.5.31 受理

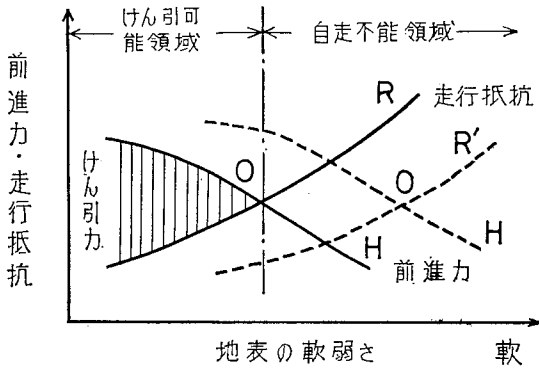


図-3 地表の軟弱さと前進力、走行抵抗の関係

示した土壌条件との関係である。最大値はコンクリート上で1.0に近い値が得られているが、水分が多くなり軟弱になるとけん引係数は小さくなり、一層軟弱な地表では自走さえ困難な状態になる。

このけん引力、走行抵抗、地表の軟弱さなどの関係を示すと図-3⁴⁾のようになる。すなわち、地表の軟弱さが増加するにしたがって一般に前進力は低下し、反対にころがり抵抗（走行抵抗）は増加する。図のO点より左の前進力と走行抵抗の差がけん引力となるが、両者の等しいO点は自走可能の限界で、それより右の領域では自走できない。無限軌道のようなものではこの限界がO'のようにさらに右へ移る。

この軟弱さという表現で示された地表の状況は図-2における土壌の種類と同じように非常に概念的なもので、このままの形では走行抵抗とかけん引力などを数量的に関係づけることはできない。ごく最近まで、このような表わし方だけが機械に対する土の性質の表示法であった。しかし、機械の性能、とくに土の状況によってそれが大きく影響を受ける場合、土の強さあるいは抵抗を何らかの形で数量的に表現する必要が生ずる。

Nichols¹⁾は土の性質を一次的なものに二次的なものに分け、一次的なものに粒径、水分、比重、組成などの物理的要因をあげ、二次的な動的性質としてせん断性、圧縮性、付着力、凝集力などの力学的要因をあげている。機械との関係においては一次的な要因よりもむしろ力学的な動的要因が直接大きな相関をもつものと考えられる。Bekker⁵⁾はこれらの力学的要因のいくつかに土の特性を表わす係数を導入して数式化し、それらを用いて車両のけん引力、前進力、走行抵抗などの性能を関係づけた。すなわち、車両の土に対する作用を単純化した小さなModelを用いて荷重-変形曲線を得、それから土のもつ特性を係数として取り出し車両性能の式に導入したのである。

たとえば、前進力は走行装置が土をせん断することに

よって得られた土の反力であるとし、できるだけ車両のせん断作用に似た作用をもつ小さなせん断試験器を用いて応力-ひずみ曲線を得る。その応力-ひずみ曲線の形状から一連の係数を得て土の力学的特性とし、けん引力と土との関係を考察しようとするものである。同様な考え方によるいくつかの報告があるが、次に、土の強さ（力学的な特性）がどのような形で性能と関係づけられているかについてとりまとめた。

3. 変形係数 k_c, k_p, n ところがり抵抗

トラクタの走行抵抗のうちの大部分をしめるころがり抵抗は土を圧縮、排除するため、あるいは障害物をのりこえる際の抵抗などによるものであるが、Bernstein⁶⁾は車両のころがり抵抗は土中に“わだち”を作るためになされる仕事によるものであると考え、

$$Rl = bl \int_0^{z_0} p dz \tag{1}$$

R : ころがり抵抗, l : 前進距離

b : 車輪幅, p : 圧力, z : 沈下量

とし、小さな板を用いて圧縮試験を行ない、それから得られた荷重と沈下量の関係 $p = kz^{0.5}$ を用いてころがり抵抗を次のように表わした。

$$R = \frac{0.87}{\sqrt{bk}} \frac{W^{3/2}}{D^{3/4}} \tag{2}$$

k : 係数, W : 車輪荷重, D : 直径

その後、Goriatchkin⁷⁾などによって荷重と沈下量の関係は次のように一般的な形に書きかえられた。すなわち、

$$p = kz^n \tag{3}$$

k : 変形係数, n : 変形指数

この関係は図-4のように、両対数グラフで直線関係になり、 k は p 軸の截片の長さ、 n は直線のこう配で示さ

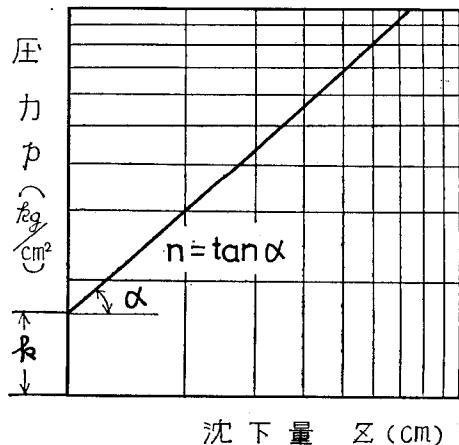


図-4 圧力-沈下量の関係

れる。 n は載荷板に無関係な土の性質による指数で、軟弱な土では $n < 1$ 、かたい土では $n > 1$ である。しかし、 k は載荷板の面積に影響を受けるため、土の特性を表わすものとするため、Bekker⁸⁾は k_c 、 k_ϕ の2個の係数を用いて次のような形で表わした。

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (4)$$

よく知られているように、 k_c 、 k_ϕ および n は soil Values (土質常数) と名付けられ、圧縮作用をうけたときの土の強さを示す値として種々の車両性能を示す式の中に導入された。

たとえば、次の式は Bekker によって導かれた剛性被けん引車輪のころがり抵抗で、(1)式と同じく土の圧縮抵抗がころがり抵抗であると考えて k_c 、 k_ϕ および n を用いて、車輪の直径 D および荷重 W の関数として示されている⁵⁾。

$$R = \frac{(3W)^{\frac{2n+2}{2n+1}}}{(3-n)^{\frac{2n+2}{2n+1}} (n+1)^{\frac{1}{2n+1}} (k_c + bk_\phi)^{\frac{1}{2n+1}} D^{\frac{n+1}{2n+1}}} \quad (5)$$

また、変形の大きい空気タイヤでは⁵⁾

$$R = \frac{[b(p_i + p_c')]^{\frac{n+1}{n}}}{(k_c + bk_\phi)^{\frac{1}{n}} (n+1)} + \frac{Wu}{p_i^a} \quad (6)$$

p_i : 空気圧、 p_c' : タイヤ剛性による圧力、
 u, a : 係数

で示した。第1項が土の変形、第2項はタイヤの変形に必要な抵抗である。

また、Wills⁹⁾は k のみでなく n も載荷板の影響を受けることを指摘し、帯状フーチングに対する Meyerhof¹⁰⁾の支持力に関する考え方を用い、 n を z/b の指数として次の式を提案し、実際の関係を一層よく表わすことができると述べている。

$$p = \left\{ ck_c' + \frac{\gamma b}{2} k_\phi' \right\} \left(\frac{z}{b} \right)^n = k' \left(\frac{z}{b} \right)^n \quad (7)$$

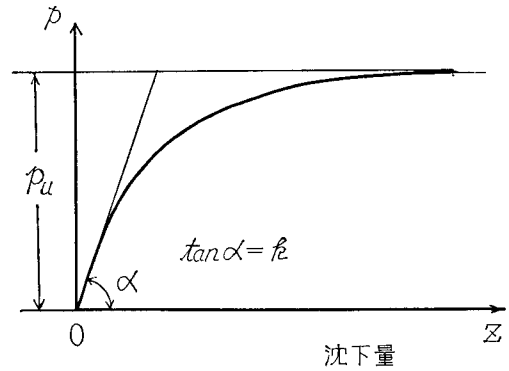
c : 粘着力、 γ : 比重量

また、Evans¹¹⁾は粘着性の上に対して荷重—沈下量の関係が次のような指数関数関係にあるとした。この場合の土の強さは極限破壊強さ p_u と係数 k で示される。

$$p = p_u (1 - e^{-\frac{kz}{b}}) \quad (8)$$

Reece¹²⁾は p と z との関係に直線関係が得られない場合が多いため、訂正項として p_0 を加えた。すなわち、

$$p = p_0 + \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (9)$$



図—5 Kacigin の式における P_u と k

Kacigin や Guskov¹³⁾は同じくこれらの関係を双曲線関数を用いて表わす方法を提案した。すなわち、

$$p = p_u \tanh \frac{k}{p_u} z \quad (10)$$

p_u は極限破壊強さ、 k は図—5のように原点における接線の角度から求められる。これらの p_u および k を用いて無限軌道による土の圧縮のための抵抗 R を計算し、次のような式で表わした。すなわち、

$$R = \frac{2bp_u}{K_1} \left[\gamma_\delta' \ln \cosh \frac{qf}{p_u \gamma_\delta'} + \ln \cosh \left(\frac{q_e - q_f}{p_u} \right) \right] \quad (11)$$

K_1 : 土の変形係数、 γ_δ' : すべり係数

qf : 無限軌道前部の接地圧、 q_e : 後部接地圧

また、Janosi¹⁴⁾は垂直方向のみの圧縮でなく、水平方向も同時に考えて、被けん引車輪のころがり抵抗を

$$R = (k_c + bk_\phi) \left\{ [z_0^{n+1}/(n+1)] [1 - 2z_0(n+2)/D] + \int_{D/2-z}^{D/2} \frac{z^{n-1} [1 - (D+2z_0)/2z]^n [(D/2)^2 - z^2]^{1/2} dz}{z} \right\} \quad (12)$$

で示した。 $\{ \}$ の中の第1項は垂直方向の、第2項は水平方向に対する圧縮抵抗である。

Pope¹⁵⁾は圧力と沈下の関係が速度の影響を受け、速度の m 乗に比例するとして p と z との関係を

$$p = \left[(ck_c + \gamma bk_\phi) \left(\frac{z}{b} \right)^n \right] \left[\frac{V}{ru_0} \left\{ r^2 - (r + z - z_0)^2 \right\}^{1/2} \right]^m \quad (13)$$

とおき、ころがり抵抗を

$$R = \frac{1}{(n+1)(bK_2) \left[\frac{1}{(2^{n+1} + m)} \right]} \left\{ \frac{3W}{(3-n)\sqrt{D}} \right\}^{\frac{2n+2+m}{2n+1+m}} \quad (14)$$

ただし

$$K_2 = \left(\frac{ck_c + rbbk_g}{b^n} \right) \left(D^{m/2} u_0^m \right)$$

V: 前進速度, u_0 : 沈下速度, r: 車輪半径

このほか類似した式が二、三発表されている¹⁶⁾¹⁷⁾が、いずれもその考え方の基礎となっているものは、車輪、無限軌道などによる圧縮作用を Simulate した小さな板によって圧力—沈下曲線を得、それから k_c , k_g , k あるいは n などの変形係数を求めて土の強さとか力学的な性状を表示し、それをを用いてころがり抵抗を求めようとしている点である。

このような小さな板の圧力—沈下量曲線から係数を求めるには、前述の式に示されたような関係曲線がなめらかな曲線とか直線で示されることが前提である。しかし、実際には土が層をなしていたり、かたさに変化があるなど不均一なために smooth な関係が得られない。比較的均一な場合でさえ、これらの係数を求めにくいことが多い。

また、車輪の下の土はすべて垂直下向きに、あるいは車輪面に垂直に圧縮され、その圧縮抵抗は小さな平板が垂直に沈下した場合の抵抗に等しいと考えているため、沈下量が大きくなったり、車輪が小さいときなど、わん曲の割合が大きくなる精度が低下する。その上ころがり抵抗が土の圧縮抵抗だけでない場合が多いため問題が残る。

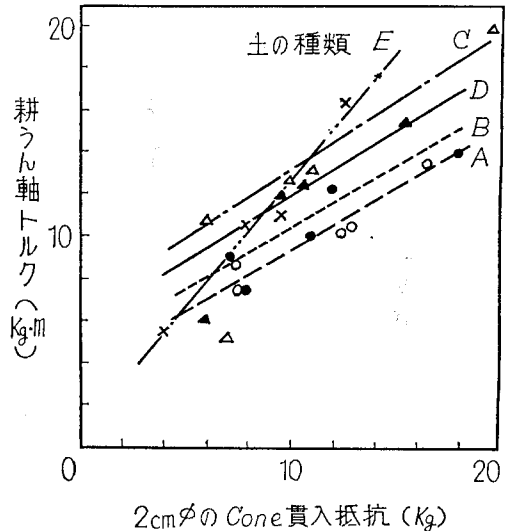
このような方法とは別に、土を粒状体とか小塊の集合体、また塑性流動体と考えて、応力—ひずみの関係を解析し、車両あるいは耕うん機械などの性能と関係づけようとする試みはまったくなかったというわけではないが、まだ利用できる段階にまで達していない^{18)–21), 59)}。それはやはり土が非常に複雑な変化性をもっているためと考えられる。乾いた砂のように、完全な粒状体の集合とみられるものから粘土を少し含んだ非常に圧縮性の大きい砂壤土、さらに水分で飽和した軟らかい粘土にいたるまで、非常に多くの種類、形態があって、その変化も連続的である。仮に、圧縮性のない塑性体と考えて塑性理論を応用して解析した結果、走行装置下の応力—ひずみの間に、あるいは破壊条件についての関係式が得られたとしても、それは非常に幅広い変化の中のごく一部にしか適用できない。しかも、そのために設けなければならない仮定も多く、得られた結果は非常に複雑である。

車両の性能の推測ということからすれば、また複雑な解析と計算のために払われる労力と得られた結果の精度を比較するならば、前述のような半実験的な係数を用いる方法でもよいかも知れないが、土の力学的な挙動との関係を理論的に考察するためには基礎的な解析もまた必要である。

4. Cone 貫入抵抗とトラクタ性能

上述のように、土の変形状態から土の力学的特性を求める方法とは異なって、種々の形状の貫入体によって土の強さを測定しようとする試みは古くからあった。これは手の届かない地表下の内部をさぐる簡易な手段として使用されてきており、目的によって多種多様の貫入体があるが、ここでは一般に用いられる cone 貫入計を対象にする。

貫入抵抗として示される土の強さは単純なものではなく、切削、せん断、圧縮、摩擦など種々の作用に対する抵抗のまじりあったものと考えられる。土木技術関係だけでなく、機械的な作用に対する土の強さを知る手段としても比較的容易な方法であるために多くの方面に利用されてきた。たとえば、Stone, Williams²²⁾ はプラウのけん引抵抗と土の貫入抵抗との間に密接な関係があると報告しているし、Zelenin²³⁾ はある深さまで貫入させるに必要な打撃回数と切削抵抗との間に比例関係があると述べている。また図—6 は Cone 貫入抵抗と耕うん軸トルクとの関係である²⁵⁾。



図—6 Cone 貫入抵抗と耕うん軸トルク

車輪の走行抵抗との関係については McKibben, Hull²⁶⁾ の報告があり、ころがり抵抗係数 f と貫入抵抗 Q との間に次のような一次関係を発表している。

$$f = 0.06Q + 0.021 \tag{5}$$

著者ら^{4), 27)}が軟弱地におけるトラクタの走行性について研究した際、車輪あるいは無限軌道が沈下した場合のころがり抵抗 R はその前面の土を排除するために必要なものであるとの考え方から、次式で示されるような沈下した深さまでの貫入抵抗の積算値 R_0 との間に相関があるものと考え、ほぼ直線関係を得た。

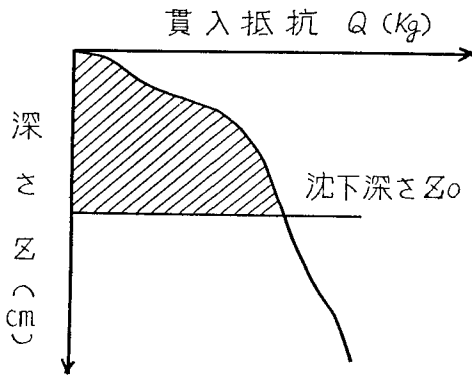


図-7 R_Q と円すい線図

$$R_Q = \int_0^{z_0} Q(z) dz \quad (16)$$

その後、中尾、田辺²⁸⁾らによってかなり詳細に研究され、土壌の状態によってそのこう配は異なるが、比例関係が得られた報告をしている。

(16)式は圧縮抵抗からころがり抵抗を求める場合の式

$$\int_0^{z_0} p dz$$

と同じ形であるが、上の場合は土の均一性、層のかたさの変化を考える要はなく、荷重と変形の関係をなめらかな曲線で示そうとするために生ずる不合理をさけることができる。

また機械の走行性の問題についてはよく知らされた W E S (Waterways Experiment Station) における研究がある²⁹⁾³⁰⁾²²⁾。すなわち、Cone 貫入計によって測定した貫入抵抗 “Cone Index” を Trafficability の尺度として、車両の軟弱地における “go” あるいは “no go” の判定に用いる。このことについてはすではほかで詳細に述べた³¹⁾ので省略する。

また、 k_c 、 k_ϕ および n による土の力学性の表示と Cone Index を比較した研究が二、三報告されている。図-8 は W E S によって行なわれた Cone Index と k_c 、 k_ϕ および n との関係である³²⁾。

また、Janosi³³⁾ はこれらの関係に次の式を与えた。

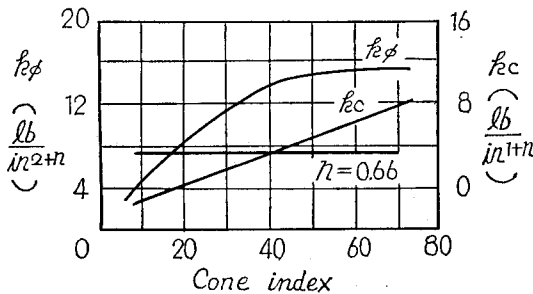


図-8 cone index と k_c 、 k_ϕ および n との関係

$$CI = 1.625 \left\{ \frac{k_c}{n+1} [(z+1.5)^{n+1} - z^{n+1}] + 0.517 k_\phi \left\{ \frac{(z+1.5)^{n+2}}{(n+1)(n+2)} + \frac{z^{n+2}}{(n+2)} - \frac{(z+1.5)z^{n+1}}{(n+1)} \right\} \right\} \quad (17)$$

CI: lb/in² で示した貫入抵抗値 (Cone Index)

Williford, Larson³⁴⁾ らは貫入抵抗と比重量 γ 、円環せん断試験によって得た粘着力 c および粘着力と内部摩擦係数 $\tan \phi$ との積などの関係について調査し、次の関係を発表している。

$$\left. \begin{aligned} CI &= a_1 + b_1 \gamma \\ CI &= a_2 + b_2 c \\ CI &= a_3 + b_3 c \tan \phi \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

a, b : 係数

このほか、Freitag³⁵⁾、田中³⁶⁾、DeRoock および Cooper³⁷⁾、あるいは Gupta, Pandya³⁸⁾ らは Cone 貫入抵抗と種々の土性との関係について考察した結果を報告している。とくに、DeRoock, Cooper らは鋼やコンクリートなどで衝撃波の伝達速度から弾性係数や密度あるいは圧縮強さを求めているのと同様に、土中における衝撃波の伝達速度と土の強さ、とくに貫入抵抗との関係を求め、Gupta, Pandya などはその速度から耕うんエネルギーを推定しようと試みている。

5. 粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ と前進力

前進力と土との関係については、英国の Micklethwait⁵⁾ が装軌車両の最大前進力を推測するため Coulomb の式を導入したのに始まり、車両の前進力は走行部による土のせん断反力によるものであるとして、土質力学的な常数を始めて機械と土との関係に用いた。すなわち

$$H = Ac + W \tan \phi \quad (19)$$

H : 前進力 A : 接地面積 W : 重量

c : 粘着力 ϕ : 内部摩擦角

この Micklethwait によって与えられた関係はそれ以後の車両のけん引力あるいは前進力に関する考察の基礎となり、その後 Bekker に引き継がれ、最大前進力のみでなく、すべり率と前進力との関係にまでおよび、次のような形で表わされた。すなわち、

$$\tau = \frac{c + p \tan \phi}{y_{\max}} \{ \exp(-k_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}) K_1 j - \exp(-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}) K_1 j \} \quad (20)$$

K_1, K_2 : すべり変形係数, j : すべり変位量

この式中の y_{\max} は $\{ \}$ の内の最大値に等しく、100%すべり時には $\tau = c + p \tan \phi$ になる。この式は土壌がせん断される際の応力-ひずみ線図が図-9(a)のよう

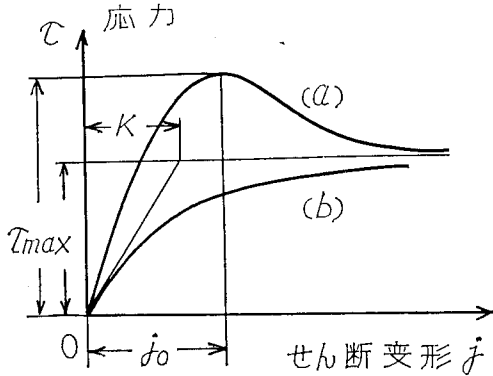


図-9 セン断応力-ひずみ線図

に、無周期減衰振動に似ていることから、その減衰係数およびばね常数を土の常数 K_1, K_2 におきかえて、走行装置のせん断抵抗をすべり変形の関数として与えたものであって、せん断時における応力-ひずみ曲線を数式化したものにほかならない。平らな載荷板による荷重-沈下量曲線を数式化して土の力学的な値をその曲線の形から得たのと同様、走行装置のせん断にできるだけ似た作用でのせん断応力-ひずみ曲線から K_1, K_2 および c, ϕ を求めるのである。このため、Bekker は走行装置によるせん断作用に似た作用をもたせたせん断装置を試作した⁵⁾。また、これらせん断試験に関する研究は最近非常に多く発表されている³⁹⁾⁻⁴⁴⁾。

②式を用いて Bekker は無限軌道の前進力とすべり率との関係を

$$H = \left\{ \frac{b(c + p \tan \phi)}{K_1 i_0 y_{max}} \right\} \left\{ 1 - \frac{\exp(-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}) K_1 i_0 l}{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}} + \frac{-1 + \exp(-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}) K_1 i_0 l}{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}} \right\} \quad (2)$$

i_0 : すべり率, l : 接地長

という形で表わした。

土木工学の分野では、せん断抵抗について古くから研究が行なわれ、その特性については充分知られており、また耕うん機械の抵抗やその性能向上のためにせん断抵抗とかせん断状況の観察が非常に役に立つと述べられているけれども⁴⁵⁾、せん断時の応力-ひずみ曲線を数式化して利用しようとする試みはなかった。

その後、Janosi, Hanamoto⁴⁶⁾ らは図-9(b)のように極大値をもたない応力-変形曲線に対して次の式を用いた。

$$\tau = (c + p \tan \phi) (1 - e^{-j/K}) \quad (2)$$

K は図に示したように、 τ_{max} の線と原点で曲線に引いた接線との交点として、あるいはまた τ_{max} の0.63とし

て求められるものである。これを用いて Janosi らは前進力 H をすべり変形 j の関数として

$$H = A \left\{ c \left(1 - \frac{1}{j} \right) (1 - e^{-j}) \right\} + p_{max} \tan \phi \left\{ \frac{1}{n+1} - \frac{1}{l^{n+1}} \int_0^l x^n e^{-i_0 x / K} dx \right\} \quad (2)$$

ただし $p_{max} = \left(\frac{k_c}{b} + k_\beta \right) z^n$, z_0 : 最大沈下量

l : 履帯長さ, x : 接地始めからの距離
 i : すべり率

のように表わした。図-10はこの式を用いた計算値と土壌槽内で行なった実測値との比較図である。

また、Kacigin, Guskov¹³⁾ からは荷重-沈下量曲線の場合と同様に双曲線関数を用いて

$$\tau = \sigma f_m \left[1 + \frac{a}{\cosh(j/K_\tau)} \right] \tan h(j/K_\tau) \quad (2)$$

のように、せん断時の曲線を数式化した。この式に用いられる土の力学性を示す値は f_m, K_τ , および a の3個であり、 f_m は極大値をすぎた後の定常せん断応力と垂直圧力の比であり、 K_τ は図-11に示したような長さ

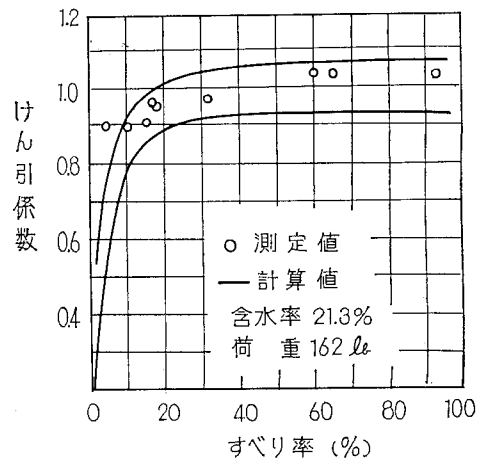


図-10 せん断係数とすべり率の関係

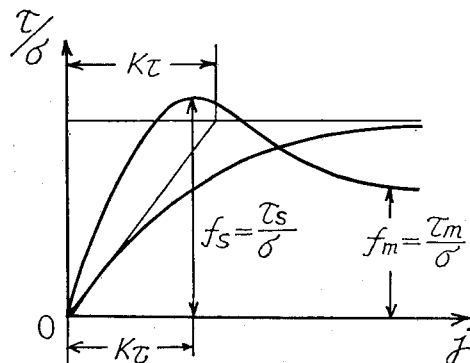


図-11 Kacigin の式における係数

を示す。また、 a は f_s と f_m の関数で

$$a = 2.55[(f_s - f_m)/f_m]^{0.825} \quad (26)$$

となる。また(b)図のように極大値をもたない場合、 $\tau_m = \tau_s$ で $a=0$ 、したがって、

$$\tau = \sigma f_m \tanh(j/K\tau) \quad (26)$$

となり、Janosi の式とよく似た形になる。

これらの式を用いて Kacigin, Guskov らは接地圧が均等に分布した場合の無限軌道の前進力を次の式で表わした。

$$H = \frac{f_m K \tau W}{il} \left\{ \ln \cosh(il/K\tau) - a \left[\frac{1}{\cosh(il/K\tau)} - 1 \right] \right\} \quad (27)$$

i : すべり率, l : 接地長

以上のように、土のせん断抵抗あるいはせん断時の特性を用いて前進力を推定する方法をいくつかの例をあげて説明したが、これはころがり抵抗を圧縮作用に対する抵抗と考え、小さな板による圧縮の際の力学的特性を用いて推定しようとした方法をまったく同じであって、非常に単純な仮定および考え方のもとに誘導されている。すなわち、接地圧は均一、沈下にとまもう接地面積の変化はなし、走行装置と土との摩擦は無視、重量転移の影響も考えないなど多くの単純化がある。したがって、実験室内で充分よく control された土壌で、不測の誤差をできるだけ除いた車輪や装置を用いての実験ではある程度の精度は得られるかも知れないが、実際のは場では非常に不規則な要素が多く困難なように考えられる²⁷⁾⁴⁷⁾⁴⁸⁾。

また、仮に小さな沈下板やせん断装置を車両の土に対するのとまったく同じように模形化したとしても、土と機械との関係における相似関係が成立しないかぎり、実際の車両の性能を推測することには不正確さが残るものと考えられる。

6. 応力分布とけん引力

図-12は車輪面に作用する垂直圧力および接線反力の分布である。このように、車輪の面には均等でない圧力が作用する。したがって車輪による制約がなければ土中のせん断面はこれらの応力によってきまる方向に生じ、それは車輪の面とは平行でないのが普通である。またこれらの分布は合力 ρ の方向と大きさによってきまり、 ρ の方向や大きさは車輪面の動きによって影響を受ける。したがって沈下板による垂直の、またせん断試験器による水平反力のようなまったく別の作用によって走行抵抗や前進力が生ずるとする考えは少し実際とは異なる。

Onafeko⁴⁹⁾⁵⁰⁾ や著者⁵¹⁾⁵²⁾ らはこのような車輪面への圧力分布から車輪の性能を解析しようとした。すなわち、

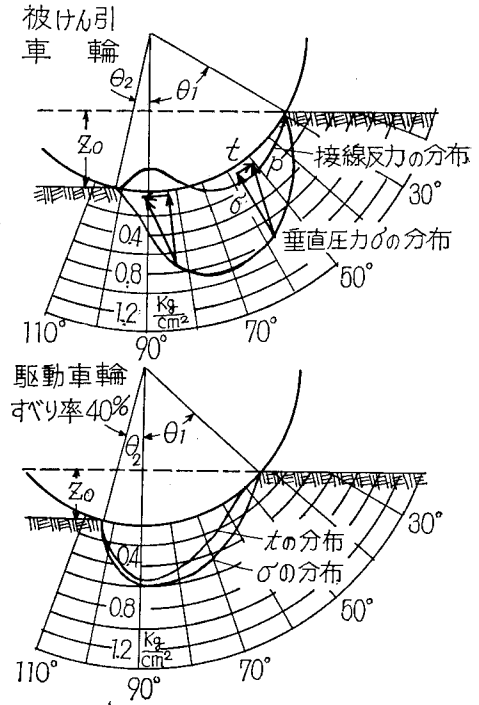


図-12 車輪下の応力分布

図-12における車輪面への垂直圧力 σ 、接線反力 t を用いて

$$\text{ころがり抵抗 } R = r b \int_{Q_1}^{Q_2} \sigma \sin \theta d\theta \quad (28)$$

$$\text{前進力 } H = r b \int_{Q_1}^{Q_2} t \cos \theta d\theta \quad (29)$$

とする。また、 σ 、 t の垂直成分は車輪への荷重と、また t による中心軸に関するモーメントはトルク T とつりあうと考える。

しかし、この式を解くに当っては、 σ および t の分布を知る必要があり、さらに一般化するためには、これらが土のもつ特性とどのような関係になるのかを数式化しなければならない。

Wong, Reece⁵⁰⁾ らは σ に荷重一沈下量についての Bekker の式、 t にせん断抵抗の関係を導入して解いた例を発表しているが、Onafeko⁴⁹⁾ らはこのような半径方向の圧力は沈下板による結果とは等しくない述べている。

また、応力分布については多くの報告があるけれども^{53)-58), 60)-62)}、土の特性との関係についてはほとんど述べられていない。今後の問題である。

7. その他、支持力係数などと走行性能

次の式は Bekker が泥土を排除しながら前進する際の

排土抵抗を Terzaghi の支持力係数を用いて表わしたものである⁵⁾。

$$R_b = \frac{b \sin(\alpha + \phi)}{2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha} [2zcK_c + rz^2K_r] \\ + \frac{\pi t^3 \gamma (90 - \phi)}{540} + \frac{c \pi t^2}{180} + ct^2 \tan(45 + \phi/2) \quad (30)$$

$$K_c = (N_c - \tan \phi) \cos^2 \phi$$

$$K_r = \left[\frac{2N_r}{\tan \phi} + 1 \right] \cos^2 \phi$$

$$t = z \tan^2(45 - \phi/2)$$

α : 接近角, ϕ : 内部摩擦角, γ : 比重量

N_c, N_r : 支持力係数, c : 粘着力

また, すべり沈下について³³⁾,

$$z_j = \frac{j[p - c N_c - r(N_q z_s + 0.56 N_r)]}{c + p \tan \phi + r N_q j} \quad (31)$$

j : すべり変形, N_c, N_r, N_q : 支持力係数

のように, N_c, N_r, N_q などの Terzaghi の支持力係数を導入した式を用いている。また, Reece⁶³⁾, Onafeko⁴⁹⁾ からも同様に限界支持力の考え方を導入し, 接地圧と荷重の関係に応用しようとして試みている。

また, 受働土圧に関する Rankin の理論を無限軌道のラグの下に, あるいは車輪前部上面の上の移動に対する抵抗に応用して前進力, 走行抵抗を得ようとした例も多く見られる⁵⁾⁶⁴⁾⁶⁵⁾。

そのほか, 土の特性として粘性係数を用いて粘性泥土の排除抵抗について, Rowe, Hegedus は次の式を与えている³³⁾。

$$R_v = \rho_m v^2 A C d / 2 \quad (32)$$

Cd : 抵抗係数, レイノルズ数 $N_R = \rho_m v h / \mu$ の関数

ρ_m : 密度, μ : 粘度, v : 速度

A : 面積 h : 泥土の深さ

8. おわりに

以上のように, トラクタの性能を土の力学的諸性質と関連づけるための多くの研究があるが, 土の性質の複雑さのために, 適確にそれらの関係を表示し得るものはない。しかし, トラクタとか耕うん機などの土への作用を比較的単純な作用の集合と考え, 単純な作用下における土の応力-変形の関係式を求め, さらにそれらを組合せて全体の抵抗を推測するという考え方は, 上述のように, 現在の段階では完全とはいえないが, Systematic な Simulation 手法を用いて機械と土との関係を考察するためには優れた方法であると考えられる。したがって今後, 機械と土との作用関係をどのような形における単純作用の組合せであるかということとを解明すると同時に, それら単純な作用下における土の挙動を適当な model を用いたり, 数学的な表現を用いて表わす方法を見つけるための研究も必要と考えられる。

参 考 文 献

- 1) Nichols, M. L.: Methods of research in soil dynamics as applied to implement design. Agr. Engin. 13, 279-285, (1932)
- 2) Söhne, W.: Four wheel drive or rear wheel drive for high power farm tractors. Jour. Terrmech. 5(3), 9-28, (1968)
- 3) Zonbóri, J.: Drawbar pull tests of various traction devices on sandy soils. Jour. Terrmech. 4(1) 9-17, (1958)
- 4) 田中 孝: 軟湿土壌における機械の走行性の判定基準確立に関する研究, 農林省特別試験研究費報告書(1957)
- 5) Bekker, M. G.: Off-the-road locomotion. The University of Michigan Press, Ann Arbor. (1960)
- 6) Bernstein, R.: Probleme zur experimentellen Motor Pflugmechanik. Der Motorwagen (1936)
- 7) Goriatchkin, B. P. et al.: Theory and production of agricultural equipment. Moscow (1936)
- 8) Bekker, M. G.: Theory of land locomotion. The University of Michigan press. Ann Arbor (1956)
- 9) Wills, B. M. D.: The load sinkage equation in theory and practice. Proc. second Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems. Quebec, University of Tronto Press. Tronto Ont. 199-246 (1966)
- 10) Meyerhof, G. G.: The ultimate bearing capacity of foundations. Geotechnique 2 (1951)
- 11) Evans, I.: The sinkage of tracked vehicles on soft ground. Jour. Terramech. 1(2), 33-43, (1964)
- 13) Kacigin, V. V., Guskov, V. V.: The basis of tractor performance theory. Jour. Terrmech. 5(3), 43-66, (1968)
- 14) Janosi, Z.: An analysis of pneumatic tire performance on deformable soils. Proc. First Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems. Edizioni Minerva Technica Torino. (1961)
- 15) Pope, R. G.: The effect of sinkage rate on pressure sinkage relationships and rolling resistance in real and artificial clays. Jour. Terramech. 6(4), 31-38, (1969)
- 16) Poletayev, A. F.: Soil compaction under a rolling wheel. Traktory i sel'khoz mashiny No. 8. (1962)
- 17) Omelianov, A. E.: Wheel of Agricultural Machines. Traktory i Sel'khoz mashiny No. 5 (1948)
- 18) Drucker, D. C.: On stress-strain relations for soils and load carrying capacity. Proc. First Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems. (1961)
- 19) Haythornthwait, R. M.: Methods of plasticity in land locomotion studies. Proc. First Int. Conf. on

- Terrain-Vehicle Systems (1961)
- 20) Shiffman, R. L. : Analysis of displacement of the ground surface due to a moving vehicle. Proc. First Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems (1961)
 - 21) Kurtay, T., Reece, A. R. : Plasticity theory and critical state soil mechanics. Jour. Terramech. 7 (3,4), 23-56, (1970)
 - 22) Stone, A. A., Williams, I. L. : Measurement of soil hardness. Agr. Engin. 20, 25-26, (1939)
 - 23) Zelenin, A. N. : Basic physics of the theory of soil cutting. (1950), Gill, W. R., VandenBerg, G.E. : Soil Dynamics in Tillage and Traction より引用
 - 24) Gill, W. R., VandenBerg, G. E. : Soil Dynamics in Tillage and Traction (1967)
 - 25) 増田, 田中, 妻鹿 : ロータリ耕うんにおける土性の影響について (1970) 未発表
 - 26) McKibben, E. G., Hull, D.O. : Transport wheels for agricultural machines. VIII. Soil penetration tests as a means of predicting rolling resistance. Agr. Engin. 21, 231-234, (1940)
 - 27) 増田, 田中, 箕田 : トラクタのけん引性能と土の強さに関する研究 農機誌 29(3) 119-127 (1937)
 - 28) 中尾, 田辺 : 干陸ほ場におけるトラクタの走行性について (2), 島根大学農学部研究報告4号 164-168 (1970)
 - 29) Knight, S. J., Rula, A. A. : Measurement and estimation of the trafficability of fine grained soil. Proc. First Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems. (1961)
 - 30) Knight, S. J., Freitag, D. R. : Measurement of soil trafficability characteristic. Trans. ASAE 15 (2), 121-124, (1962)
 - 31) 田中 : 軟弱地でのトラクタ通行可否判断に対する基準の確立, 農機誌, 25 (2), 119-122, (1963)
 - 32) WES : Strength-Moisture-Density relations of fine grained soils. Waterways Experiment Station TR-3-639, Vicksburg, Miss. (1954)
 - 33) Bekker, M. G. : Introduction to Terrain-vehicle systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor. (1969)
 - 34) Williford, J. R., Larson, L. W. : A study of soil strength values included in cone index readings. Paper No. 68-666 presented at the 1968 Winter meeting of ASAE (1968) Chicago
 - 35) Freitag, D. R. : Penetration test for soil measurement. Trans. ASAE. 11(6), 750-753, (1938)
 - 36) 田中, 西村, 東, 北川 : 水田におけるトラクタ性能判定に関する研究, 第2報, 農機誌, 26(3), 173-175, (1964)
 - 37) DeRoock, B., Cooper, A. W. : Relation between propagation velocity of mechanical waves through soil and soil strength. Trans. ASAE 10(4), 471-474 (1967)
 - 38) Gupta, G. G., Pandya, A. C. : Behavior of soil under dynamic loading-Its application to tillage implement. Trans. ASAE 10(3), 352, (1967)
 - 39) Taylor, J. H. : An Annular shear devices. Trans. ASAE 10(2), 164-164-165, (1967)
 - 40) Bailey, A. C., Weber, J. A. : Comparison of methods of measuring soil shear strength using artificial soils. Trans. ASAE 8(2), 153-156, (1965)
 - 41) Dunlop W. H., VandenBerg, G. E., Hendrick, J. G. : Comparison of soil shear values obtained with devices of different geometrical shapes. Trans. ASAE 9(6), 896-900, (1966)
 - 42) Osman, M. S. : The measurement of soil shear strength. Jour. Terramech. 1 (3), 54-60, (1964)
 - 43) Cohron, G. T. : Soil shear graph. Agr. Engin. 44 (10), 554-556, (1963)
 - 44) 田中 : 試作一面せん断兼単軸圧縮試験器について, 農機誌, 32(3), 232-236, (1970)
 - 45) Nichols, M. L. : The dynamic properties of soil, I-IV. Agr. Engin. 12, 13 (1931-1932)
 - 46) Janosi, Z., Hanamoto, B. : Analytical determination of the drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. Proc. First Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems. (1961).
 - 47) 田中, 西村, 東 : 水田におけるトラクタ性能判定に関する研究 (第6報) 農機誌, 28(1), 14-19, (1966)
 - 48) 増田, 田中, 西村, 山崎 : 軟弱地における装軌トラクタの性能, 農機誌, 28(3), 141-148, (1966)
 - 49) Onafeko, O., Reece, A. R. : Soil stresses and deformations beneath rigid wheels. Jour. Terramech. 4(1), 59-80. (1967)
 - 50) Wong, Jo-Yung, Reece, A. R. : Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses. Part I. Performance of driven wheels. Jour. Terramech. 4(1), 81-98, (1967)
 - 51) 田中 : 湿田への動力耕うん機の導入に関する研究, 第2報, 土壌の車輪面への圧縮反力について, 農機誌, 19 (1), 13-17 (1957)
 - 52) 増田, 田中 : トラクタのけん引性能に関する研究, 第5報, 第6報, 農機誌, 26(1), 8-13, (1964)
 - 53) Yong, R. N., Windish, E. : Determination of wheel contact stresses from measured instantaneous soil deformations. Jour. Terramech. 7(3), 57-67, (1970)
 - 54) Krick, G. : Radial and shear stress distribution under rigid wheels and pneumatic tires operating

- on yielding soils with consideration of tire deformation. Jour. Terramech. 6(3), 73-93, (1969)
- 55) VandenBerg, G. E., Gill, W. R. : Pressure distribution between a smooth tire and soil. Trans ASAE 5(2), 105, (1962)
- 56) Hegedus, E. : Pressure distribution under rigid wheels. Trans ASAE 8(3), 305, (1955)
- 57) Onafeko, O. : Instrumentation for measuring radial and tangential stresses beneath rigid wheels. Jour. Terramech. 1 (3) 61-68, (1964)
- 58) Vincent, E. T. : Pressure distribution on and flow of sand past a rigid wheel. Proc. First Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems. (1961)
- 59) Dagan, G., Tulin, M. P. : A study of the steady flow of a rigid plastic clay beneath a driven wheel. Jour. Terramech. 6(2), 9-27, (1969)
- 60) Uffelmann, F. L. : The performance of rigid cylindrical wheels on clay soil. Proc. First Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems. (1961)
- 61) 田中：湿田への動力耕うん機の導入に関する研究，第3～6報，農機誌，19(4)，20(3)，20(4)，(1957～1958)
- 62) 田中：農用車輪下の土中における応力分布について，農機誌 21(1) (1959)
- 63) Reece, A. R., : Principles of soil-vehicle mechanics. Proc. Vol. 180, 2a. The Institute of Mechanical Engineer, Automobile Division, London (1965-1966)
- 64) Reece, A. R., Wong, J. Y. : Soil failure beneath rigid wheels. Proc. second Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems. (1966)
- 65) Masuda, Tanaka, Oida : Soil deformation under model shoe and its reaction evaluated from shear stress-strain characteristics. Proc. third Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems. (1969)