

車輪の接地面における圧力分布

穂波 信雄*

1. はじめに

土壌面上を走行する車輪の走行機構は土と車輪の接地面における力の相互作用に関する問題であるから、接地圧の分布状態を知ることが重要になる。ところで、この分野における研究では、すでに解析的手法を試みたいいわゆる Bekker 理論¹⁾があり、また接地圧分布を測定した実験的研究の結果も数多く報告されている^{2),3),4)}。しかし、前者についてみれば、実測された接地圧分布なども考慮して、理論の修正と展開が引き続き試みられてきたが、その理論的基礎において、矩形板による土の「圧力—沈下特性」を、すべりの伴ったころがり運動をしている車輪の接地面モデルと関連させた点に基本的な不合理がみられ、また実測を中心とした研究においても、さまざまな実験条件における測定結果がみられるにもかかわらず、土と車輪との間の力学的状態をあらわす適切な方法は明確になっていない。

ここでは、乾燥砂と剛体車輪を使って、土—車輪系のモデルとし、走行機構を構成している問題のなかから、接地圧分布に関連した2, 3の問題を取り上げて考察を試みる。

2. 接地圧分布

車輪の接地圧分布はその測定技術の面からみれば、接地面に対して法線方向と接線方向の2つに分けて考えるのが適当であろう。実測された例からみられる接地圧分布はそれぞれ測定法やその条件が異なり、必ずしも一様ではないが、筆者が測定した1例を上げると図—1のような結果が得られた⁵⁾。ここで、法線圧力 P と接線圧力 S はリム面に設けた受圧面に対して、それぞれの方向に作用している土壌反力をその受圧面積で除して平均圧力としてあらわしたものである。

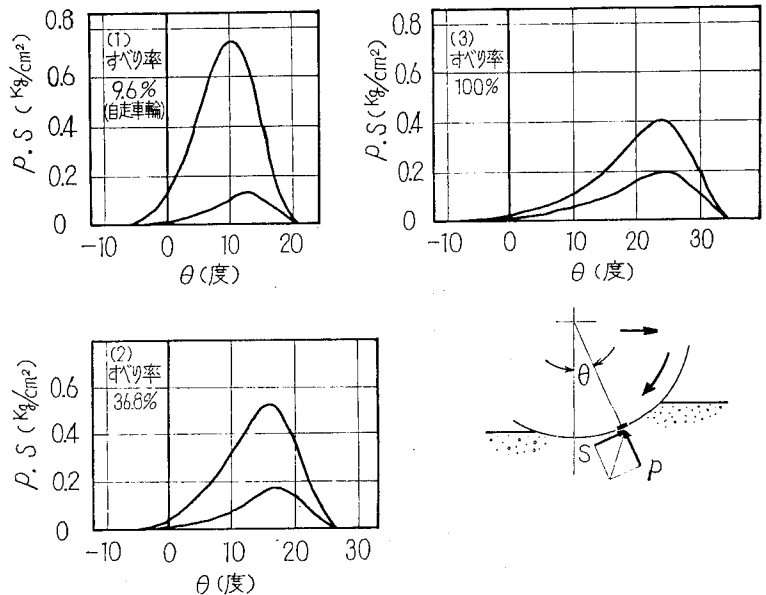
一般に接線成分は法線成分とともに

に変化するものと考えられ、この二つの成分の間の極限状態は摩擦条件によって規制されるものとみなされる。

したがって、法線成分は接地圧分布における第1次的成分であり、接線成分はその第2次的成分とみることができであろう。

1. 法線成分 P について

土壌条件を乾燥砂として摩擦性土壌に限定して考えるならば、法線圧力の分布状態は車輪の大きさ(直径と幅)、車輪荷重、すべり率などによって変化すると考えられるが⁵⁾、自走車輪(けん引負荷を伴わない駆動輪)を基準としてみると、分布の一般的な形は中央にピークを示す対称的な山形をなしている。車輪の大きさと荷重は沈下量を規制して、接地面積を変化させるので、接地圧分布における幅(接触角度)およびピークの絶対値を増減させるが、分布の基本的な形には変化がみられない。すべり率の増加はすべりによる沈下を促し、接地圧分布は荷重による作用と同様の影響を受けるが、基本的に異なる点はピークの相対的な位置が変化することである。したがって、各走行条件に対して分布の基本的な



図—1 接地圧分布の例

車輪：鉄車輪(22×2.5in) 荷重：22kg 土壌条件…乾燥砂

* 大阪府立大学農学部 1971.6.1 受理

形を決定している支配的要因はピークの相対的な位置の変化をもたらすすべり率として与えられるであろう。いずれにせよ、すべり率とは無関係に、ピークがつねに車軸の鉛直下に予想される「圧力-沈下特性」すなわち Stress-strain 関係に支配される力学的状態とは異なっていることが明らかである。

2. 接線成分 S について

接線成分 S は先にも触れたように、法線成分の 2 次的成分であり、さらにその極限状態は乾燥砂と車輪との間の摩擦条件に規制されると考えられるから、分布の基本的な形はほぼ法線成分の形に従うとみてよい。しかし、両成分におけるピークの相対的な位置はすべり率によって異なっている (図-1)。すべり率が小さい段階においては両者の位置関係が明らかに異なっているのに対して、すべり率の増加に伴ってその差は減少し、すべり率 100% ではほぼ完全に一致する。ところで、すべり率の変化に伴う接地面上の効果は、結局各接地面要素における運動状態、すなわち運動方向と速度の変化としてあたえられると考えられるから、すべり率の変化に対応した両者の関係は接地面の運動状態の変化に対応し、その極限状態が摩擦条件に規制されるとみることができよう。

すべり率 100% についてみれば、接地面の状態はすべり摩擦の状態とみなされるので、接地面全体が極限状態となり、したがって、両者の比 (s/p) は一定となり、ピークの位置が一致する (図-3)。一方、すべり率の影響が少ない自走車輪では、接地面における運動状態すなわち、幾何学的条件が主として両者の関係を支配していると考えられるが、図-2 において (s/p) が $\tan \theta$ に近いところにみられることは興味深い。

3. 接地面の摩擦

車輪の基本的性能がけん引性能によって評価され、そ

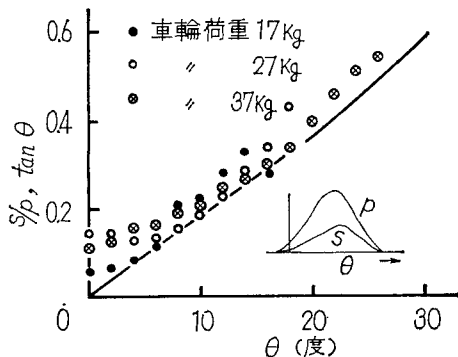


図-2 接地面における s/p の変化 (自走車輪)
車輪: 20 x 3 in 土壌条件: 乾燥砂

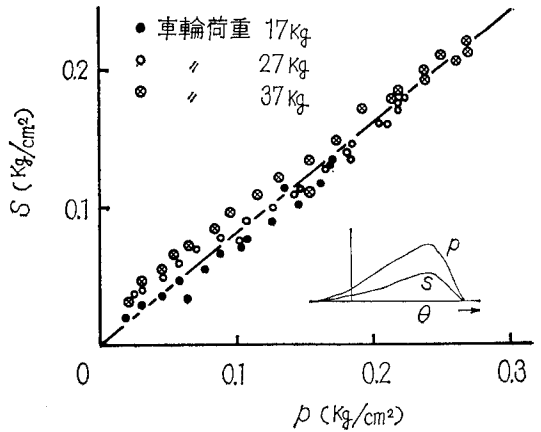


図-3 P と S の関係 (すべり率 100%)

のけん引性能が接地面の摩擦条件によって規制されるとするならば、土と接しているリム面上の各要素面がけん引性能に対して果たす機能について、そこに作用している接地圧の両成分がもっている摩擦条件から考えることが重要であろう。

ところで、この二つの成分の間には一般に次のような関係がなりたつ。

$$h = s \cos \theta - p \sin \theta = p \cos \theta (k - \tan \theta) \quad (1)$$

$$v = s \sin \theta + p \cos \theta = p \cos \theta (k \tan \theta + 1) \quad (2)$$

$$t = r \cdot s \quad (3)$$

ここで、 h 、 v 、 t は要素面上の水平、垂直、トルクに関する各成分、 r は車輪半径、 $k = s/p$

上式において、 k を要素面における摩擦条件に関する変数と考えて、けん引性能に対して要素面上の接地圧成分が与える効果をまとめてみると表-1 に示す結果となる。

上の表から明らかなくとく、けん引性能に対して有効な p と s の関係は $k > \tan \theta$ の条件でなければならない。

表-1

	$K > 0$	$K = 0$	$0 < K < \tan \theta$	$k = \tan \theta$	$\tan \theta < k < K$
h	-	-	-	0	+
v	+	+	+	+	+
t	-	0	+	+	+

h : 正はけん引負荷に有効、負は走行抵抗の圧加

v : 正は車輪荷重の支持力成分

t : 正は駆動状態、負は制動状態

K : k の最大値、つまり接地面上における見かけの摩

摩擦係数

$k = \tan \theta$ の場合はけん引性能に有効な成分は存在せず、単に車輪荷重を支持する成分 v と、その成分が車輪に対して前方に作用しているために生じるころがり抵抗モーメント（走行抵抗に相当する）となる成分 t が存在することを意味する。図-2 において、自走車輪のようなすべり率が小さい場合—けん引荷が作用していない— s/p が $\tan \theta$ に近い関係にあるとして示される事実はこのような状態に対応しているものとみなされる。ただし、すべり率 $= 0$ の場合は $0 < k \tan \theta$ の領域に関する部分で、この問題は別の機会に取り上げる。いずれにしても、 $k \leq \tan \theta$ ではけん引性能に有効な成分は存在せず、単に走行抵抗の増加分が残るのみである。以上の結果から、接地面がけん引性能に有効に機能する条件は図-4 の斜線部分として示される。

4. 接地面下の土の挙動

前項では、接地圧の2つの成分の相対的關係から、車輪の走行性に対する接地圧成分の定性的な面について触れたが、接地圧、とくにその第1次的成分である法線成分 p の分布に関する定量的関係については何ら明らかになっていない。この問題に関して行なわれた1つの試みは、Jo-Yung Wong と A. R. Reece⁶⁾ が接地面下の土の挙動に注目したことである。図-5 に示されるような観測結果に対して、接地面下の土の挙動を塑性流動をす領域とみなし、点Aによって示される transition point が法線成分 p のピークに対応すると判断した。塑性学の立場からみた厳密な解釈は別として、接地圧分布の測定結果とこの transition point の観察結果は、車輪の各走行条件（すべり率の変化）において現象的にはよく

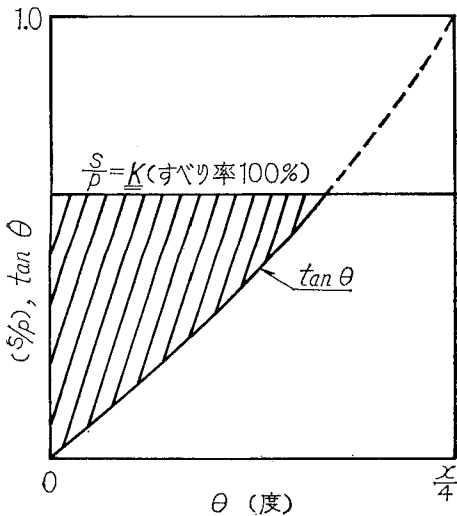


図-4

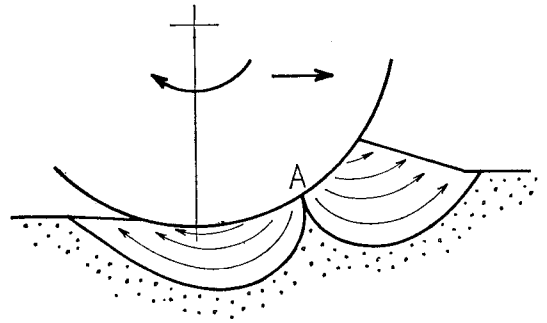


図-5 接地面下の土の挙動モデル

対応しているようであり、分布特性を明らかにするための重要な手がかりとなしう⁷⁾。

一方、E. J. Windisch と R. N. Yong⁷⁾ は同様に塑性流動とみなして、その領域の歪み速度分布の計算を試み、その結果から塑性すべり線場の問題として解析することが有効であると指摘している。筆者はこのような土の挙動に対して、よう壁問題のすべり線場モデルを仮定し、境界条件には実測結果から得られた接地圧分布を代入して、Sokolovskyの方法に従ったすべり線の計算を試みた⁸⁾。その結果では、モデルの設定や境界条件の与え方などに若干の問題はあるが、比較的単純な挙動を示すすべり率100%や固定車輪の場合など部分的にはかなりよく一致することが確められた。したがって、接地面下の土の挙動が土と車輪との間における力学的相互作用の総合された結果として与えられる現象であるとみなせば、その土の挙動に力学的な解釈を加えることが、接地圧分布の問題はもちろんのこと、さらに進んで走行機構それ自身の解析において有効であろうと判断される。このためには、接地面下の土の挙動に対して、その力学的状態をあらわす適切なモデル（例えば、よう壁問題のすべり線場のごとく）の設定とそのモデルに対する境界条件、とくにすべりを伴ったころがり運動をしている車輪の特殊な条件を考慮して、が走行条件との関連において塑性学の立場から吟味されることが望まれる。

5. むすび

乾燥砂のような摩擦性土壌を例として考えると、車輪の接地面における力の相互作用はすべり率の変化、すなわち接地面要素の幾何学的条件を与える運動状態と摩擦条件に規制されている点に特徴的な関係が認められる。車輪の走行機構はこれらの関係を基礎として、接地圧の第1次的成分である法線成分を定量的に把握することによって明らかにできるであろう。このためには接地面下の土の挙動に対する力学的状態モデルが明確にされるこ

とがまず第1に必要である。塑性流動におけるすべり線場の問題は比較的適応性があると考えられる一つの方法ではあるが、動的条件に対応したモデルとその境界条件の設定は必ずしも容易ではない。したがって、ころがり運動をしている車輪の下の特殊な状態を考慮して、土の挙動に対する力学的状態モデルが塑性学の立場から検討される必要がある。

引用文献

- 1) M. G. Bekker : Theory of Land Locomotion., The University of Michigan Press (1962)
- 2) O. Onafeko and A. R. Reece : Soil Stresses and Deformations beneath Rigid Wheels., Journal of Terramechanics. (1967) Vol. 4 No. 1
- 3) E. T. Vincent : Pressure Distribution and Flow of Sand Past a Rigid Wheel., 1st International Conference on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems. Preliminary Copy No. 46, 1961
- 4) F. L. Uffelmann : The Performance of Cylindrical Wheels on Clay Soil. Fighting Vehicles Research and Development Establishment, England. (1961)
- 5) 穂波, 土屋 : 車両系の力学的体系 (第1報), 農機誌30.2 (1968)
- 6) Jo-Yung Wong and A. R. Reece : Prediction of Rigid Wheel Stresses. (Part I, II).. Journal of Terramechanics Vol. 4 No. 1, No. 2 (1967)
- 7) E. J. Windisch and R. N. Yong : The Determination of Soil Strain-Rate Behaviour Beneath a Moving Wheel
- 8) 穂波 : 土一車両系の力学的体系 (第5報) 農機学会 (第40回) 講演要旨 (1971)