

## コーン貫入抵抗計測の高精度化

# High-precision measurement of cone resistance by a portable-type penetrometer using motorized cylinder

Key words: cone resistance, cone index, mobility number, soil bin

農業システム工学分野 福田 貴

## 1. 緒言

近年、世界で進むアフリカやアジアを中心にした急速な発展により、今後建設機械や農業機械などのオフロード車両の需要増加が見込まれる。また、環境保全やエネルギー需要の観点から、オフロード車両の作業効率向上、環境負荷の低減が求められている。オフロード車両はタイヤと土壌の状態から大きな影響を受けるため、作業効率を向上させるためには土壌と機械の相互作用に関する研究が必要となる。

本研究ではコーン貫入抵抗測定装置を小型かつ軽量に設計し、高精度な計測ができるように製作する。得られたデータを今後 DEM シミュレーションの発展に活用することを想定し、様々な土のモデル試料を用いて円筒土槽においてコーン貫入を行う。また、けん引性能計測装置の土槽において得られる正確なコーン指数を用いて、Brixius<sup>1)</sup>や Hegazy<sup>2)</sup>の提案する予測式により推定されたけん引係数やけん引効率を西山の研究<sup>3)</sup>で得られたけん引性能の実験結果と比較し、欧米の大型農用トラクタ・タイヤを対象として提案されたモビリティ数が小型タイヤにも有効であるかどうかを確認する。

## 2. 実験装置および方法

コーンは貫入量と貫入速度を調整することができる電動シリンダ(オリエンタルモーター株式会社; ELCM6E20MKRAP)によって送り出す。貫入抵抗はコーン取付軸と駆動部分を繋ぐ箇所に取り付けられたひずみゲージを使用したロードセル(株式会社共和電業; LUR-A-500NSA1)、コーンの貫入深さは電動シリンダに併設したレーザ距離計(オムロン株式会社; ZX-LD300)により計測する。

### 2.1 円筒土槽におけるコーン貫入抵抗測定

実験には試料(粒径(mm); 粒子密度 (g/cm<sup>3</sup>))としてアルミナボール(3, 4, 5 の混合; 3.6), ガラスビーズ(5 ; 2.5), 乾燥した豊浦標準砂(平均 0.267 ; 2.65), ろ過砂(平均 0.6 ; 2.62)を用意した。締め固め具合は試料を充填する際に土槽の側壁にハンマに

よって打撃を加えることによって変化させた。締め固め条件は打撃回数がアルミナボールで 0, 2, 5 回, ガラスビーズで 0, 10, 20 回, 豊浦標準砂, ろ過砂で 0, 5, 15 回であった。実験は各締め固まり具合で 3 回行う。また貫入速度は 10 mm/s, 貫入量は 150 mm で実験を行う。

### 2.2 単車輪試験装置を用いたコーン貫入抵抗測定

西山は単車輪試験装置(Single Wheel Tester 以下 SWT)を使い、スムースタイヤ、耕うん機用タイヤ、芝刈り機用タイヤの 3 種類のタイヤについて、タイヤ規格やタイヤ空気圧、けん引係数、推進係数、走行抵抗係数、滑り率を計測した<sup>3)</sup>。本実験で SWT の土槽内のコーン指数(貫入抵抗値をコーン先端の円錐投影面積で除した値)を計測することにより、西山が計測したその他のパラメータと計測したコーン指数を使い、Brixius や Hegazy が提案した性能予測式を適用することができる。これより、西山が計測したけん引係数、推進係数、走行抵抗係数と性能予測式から得られたそれらの値を比較できる。

今回のコーン貫入抵抗測定装置を使い、西山の研究で使用した SWT の土槽内でコーン貫入抵抗測定を行った。土槽の内寸は、長さ 3015 mm, 幅 480 mm, 深さ 605 mm である。試料の締め固め具合を調整するために攪拌・転圧装置(Mixing and Compaction Device 以下 MCD)を使用した。MCD は、土表面を同一で均質な条件を維持するために整える装置である。これは砂を攪拌するための電動耕うん機(井関農機 KDC 20; 300 W)と、転圧するための電動モータ(KYOWA KMP; 400W)で駆動するゴム被膜ローラからなる。

## 3. 実験結果

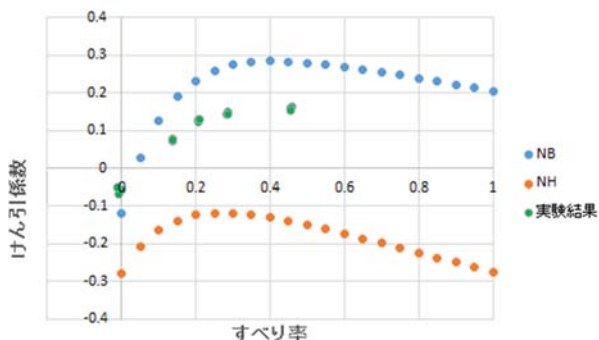
### 3.1 円筒土槽におけるコーン貫入抵抗測定

一部例外はあったが、全ての試料でハンマの打撃回数に応じて間隙率が変化した。また、全ての試料で、貫入量が大きくなるのに比例して貫入抵抗が大きくなった。さらに、全ての試料で間隙率が小さく

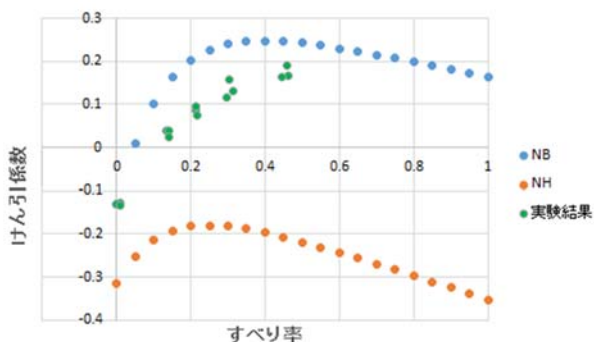
なるにつれて貫入抵抗が大きくなった。間隙率が同じアルミナボールとろ過砂を比べると、明らかにろ過砂の貫入抵抗の方が大きくなった。

### 3.2 単車輪試験装置におけるコーン貫入抵抗測定

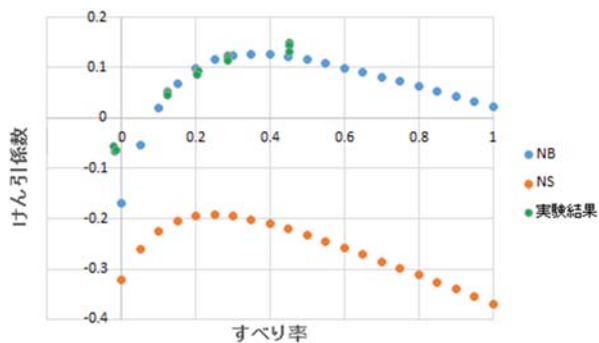
図1に3種類のタイヤについて、西山が調べた実験結果とモビリティ数による予測値を比較したけん引係数のグラフを示す。西山がけん引性能を調べた3種のタイヤにおいて、Brixiusのモビリティ数の予測値は近い値、近い傾向を示したが、Hegazyのモビリティ数の予測値はけん引係数が負の値を示すなど、不適当な結果となった。



(a) スムースタイヤ



(b) 耕うん機用タイヤ



(c) 芝刈機用タイヤ

図1 実験結果

## 4. 考察

円筒土槽での実験について、ハンマにより4方向から土槽に打撃を加える方法では土槽内の試料を均一に締め固めることができた。また、実験から間隙率、粒子密度、粒子形状が貫入抵抗に影響を与えていることが分かった。

モビリティ数について、Hegazyは大型ラジアルタイヤしか想定しておらず、Hegazyの提案したものでは、今回各種タイヤで適当な予測結果が得られなかった。Brixiusは小型のバイアスタイヤも想定していたため、Brixiusの提案したものでは、バイアスタイヤである耕うん機用タイヤと芝刈り機用タイヤで近い予測値が得られた。Brixiusのものを用いて、ラジアルタイヤであるスムースタイヤでも近い予測値が得られたのは、緩い砂質土壌ではタイヤの構造上の違いによる性能差が生じにくいため<sup>4)</sup>と考えられる。

## 5. 結言

製作した可搬式コーン貫入抵抗測定装置は、従来の研究で得られた結果より正確に計測できていると考えられる。今回はDEMシミュレーションの参考用のデータ収集を目的とし、各種試料についてコーン貫入抵抗測定を行い、間隙率、粒子密度、粒子形状が貫入抵抗に影響を与えていることが分かった。また応用として、欧米の大型タイヤ用に開発されたモビリティ数が日本の小型タイヤにも適応できるかどうか調べた。モビリティ数については、Brixiusが提案したもののみ日本の小型農用タイヤにも適応できると考えられる。また、Brixiusのものは緩い砂質土壌であれば、ラジアルタイヤにも適応できると考えられる。ただし、Brixiusのけん引性能予測式は正確であるとは言えず、コーン指数により、正確に予測するためには新たなモビリティ数、予測式を提案する必要があるだろう。

### 参考文献

- 1) W. W. Brixius. Traction prediction equations for biasply tires. American Society of Agricultural Engineers paper, 1987.
- 2) Shawkyy Hegazy, Corina Sandu. Experimental investigation of vehicle mobility using a novel wheel mobility number. Journal of Terramechanics, 2013.
- 3) 西山健太. タイヤ空気圧のけん引性能への影響について. 京都大学卒業論文, 2014.
- 4) P. J. Forrest, I. F. Reed, G. V. Comnstantakis. Tractive characteristics of radial-ply tires.. Transactions of ASAE, 1962.