HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	土の貫入抵抗とプラウの牽引抵抗に関する研究
Author(s)	端, 俊一; 南部, 悟; 金, 炯官
Citation	北海道大学農学部邦文紀要, 16(1), 162-167
Issue Date	1988-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/12089
Type	departmental bulletin paper
File Information	16(1)_p162-167.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

土の貫入抵抗とプラウの牽引抵抗に関する研究

端　俊一・南部　悟
(北海道大学農学部農業機械学教室)

金　炯官
(中国吉林省延辺農学院農機系)

(昭和63年1月29日受理)

Investigation of Draft Force on Moldboard Plow related with Penetration Resistance of Soil

Shun-ichi HATA and Satoru NANBU
(Laboratory of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060, Japan)

Tong-Guan JIN
(Department of Agricultural Machinery, Yanbian Agricultural College, Jilin, China)

I 緒　言

プラウにかかる抵抗は，一般にプラウ自体の機械的特性（材質，幾何的構造等），作業条件（速度，耕深等）および土壌条件（破壊強度，含水比，容積重等）により変化する。これらのうち最も複雑な影響を与えるのが土壌条件である。土の種類によってはもちろんのこと，同一の土壌であっても含水比や密度が変わると，破壊の様式まで変わることもめずらしくなく，当然プラウにかかる抵抗は大きく影響を受ける。

従来，プラウの抵抗解析に当たっては，土性，含水比，容積重とともに，コーンペネトロメータによるコーン指数が実験条件として併記される場合が多い。コーンペネトロメータは，元来地上構造物に対する地耐力や，車両の Trafficability を判定するために使われたものであるが，これを耕うん用農業機械が土から受ける抵抗のアナログとして使用するのが当初の目的であったと考えられる。しかし通常のペネトロメータによるスポット測定では，土壌条件の局部的な変化を捉えるのは困難なため，作業機にかかる抵抗をコーン指数と関連付けて解析するまでにはいたらず，実験条件としての併記にとどまっているのが現状であろう。

本報告では，土壌貫入抵抗の局所的な変化をも測定できるように，プラウボトムのそばにコーンペネトロメータを水平にとりつけ，プラウの抵抗とコーンの貫入抵抗を同時にしかも連続的に記録することにより，コーンペネトロメータがプラウ牽引抵抗のアナログとして機能するか否かを検討するとともに，プラウの牽引抵抗自身についての解析をも試みた。

II 実験装置および方法

1 測定装置

Fig. 1 に供試した水平コーンペネトロメータを示す。使用したコーンは底面積 6 cm², 頂角 30° のいわゆる大コーンである。コーンで受けた貫入抵抗は直径 15 mm のロッドにより，容量 100 kgf のロードセルに伝えられるロードセルはストレンゲージ式の小型のもの（共和電業製 LM-A 型）で，出力電圧感度は 0.892 mV/V である。本ペネトロメータはプラウフレームにステーを介して取り付けられ，コーンの先端はプラウポイントの左側方（進行方向に向かって）264 mm，上方 30 mm の位置にある。厚さ 9 mm のステーは土中に切り込むため，前縁をナイフエッジ状とし，最大 260 mm の深さでペネトロメータを水平に走行させることができる。

プラウの牽引抵抗測定には，Fig. 2 に示す6分力測定装置を製作し使用した。本分力計はL型ビームの3カ

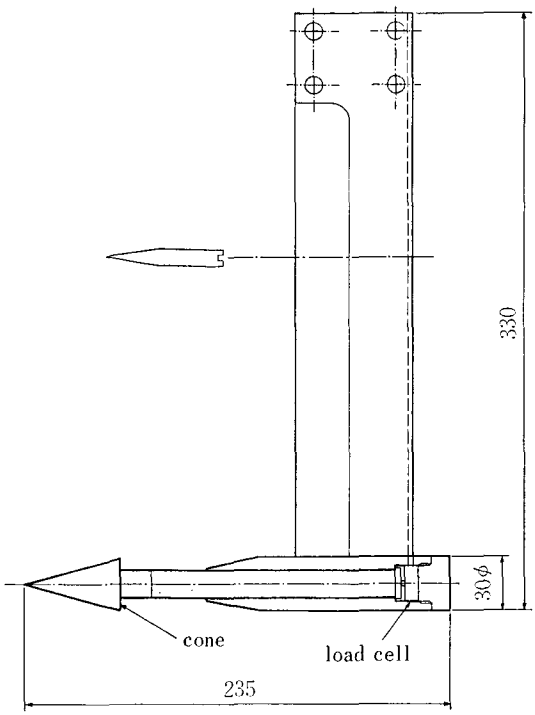

Fig. 1. Horizontal cone penetrometer.

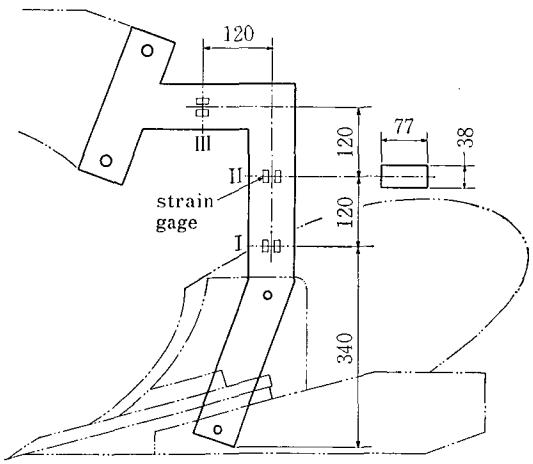

Fig. 2. Plow beam for six compornent measurement.

所にかかる6個のモーメントを測定することにより，6自由度を有するプラウの抵抗を測定するものである。いま，進行方向，横方向，上下方向にそれぞれ，x, y, z 軸をとると，断面 I, II, III で測定されるモーメントベクトルは

断面 I ……M_{Ix}, M_{Iy}
断面 II ……M_{IIx}, M_{IIy}
断面III……M_{IIIy}, M_{IIIz}

である。これら6つのモーメントベクトルより，任意の点における6分力を計算することができる。この6分力から，プラウにかかる力は合力ベクトルと，そのベクトルまわりの残留モーメントとして表わすことができ，またその着力点(抵抗中心点)も知れる。しかし本6分力計は一本のビームですべての力を曲げ歪によって測定するため，ある方向の曲げ歪が他の方向のモーメントによって干渉を受けるのを避けることができない。この干渉を補正するため，calibration により3方向のモーメントに対する出力感度をすべての検出部において求め，これらを係数とした6元連立方程式を解くことにより，6分力を決定した[1,2]。プラウの牽引抵抗は進行方向分力とした。なおビームの材質は S45C である。

耕起速度の測定は第5輪の回転パルス (2.05 cm/パルス) で，また，耕深の測定は第5輪のアーム角度をポテンショメータで検出することによった。

以上の測定データはデータレコーダに記録し，後に AD コンバータを介してコンピュータにより処理した。

2 供試プラウ

本研究に使用したプラウは14インチ2連の兼用型で，プラスチックはつ土板，バーポイントを有するものである。プラウ曲面に働く力を測定する場合は，地側板を取り外す必要があるが，本実験では実際の作業時にかかる力を検討するために，地側板は付けたままとし，コルタも所定位置に取り付けてある。6分力計は耕幅が一定している第2ボトムに装着した。供試プラウボトムの主要諸元を Table 1 に示す。

Table 1. Specification of the tested Plow bottom

Length		1163 mm
Height		486 mm
Width		758 mm
Share length		490 mm
Cutting width		356 mm
Cutting angle		48 degree
Rake angle		21 degree
Lateral direction angle of Moldboard		42 degree
Vertical suctions:	No. 1	18 mm
	No. 2	22 mm
Horizontal Suction		3 mm

3 供試圃場

実験は屋内圃場と屋外圃場の2カ所で行なった。屋内圃場は長さ40 m，幅4 mの土槽で，塑性限界30%，液性限界47%，細粒分73%のシルト(ML)である。実験時の土壌含水比は28%であった。この土槽は繰り返し試験を行なっているため，土壌構造が単粒化しており，硬く鎮圧しても比較的砕けやすい。しかし，土壌条件は均一化しやすく，再現性も高い。土壌条件の調製は，スクリューロータリにより深さ30 cmまで耕うんした後，サブソイルパッカと平滑ローラにより，所定の硬さになるように鎮圧した。

屋外の圃場は，塑性限界37%，液性限界50%，細粒分73%のシルト(MH)で，燕麦の刈り取り跡地である。実験は土の硬さの異なる時期を選んで行い，供試時の含水比は30～45%の範囲であった。硬さの調製は特に行なっておらず，自然状態のままなので，土壌条件の均一性は屋内圃場に劣る。

III 実験結果および考察

1 水平コーンペネトロメータの特性

通常，土の貫入抵抗を測定する場合は，コーンペネトロメータを1 cm/sの速度で地面に鉛直に貫入させ，その時の抵抗を各深さ毎によみとり，それをコーン底面積で除した値をコーン指数として表示する。本報告ではこれを標準コーン指数 C_s と呼び，水平コーンペネトロメータによるコーン指数を水平コーン指数 C_h と呼ぶことにする。

本実験で使用する水平コーンペネトロメータの貫入速度はプラウイング速度に等しく，2 m/s以上にもなるので，標準コーン指数測定の場合とは速度範囲が著しく異なる。このため，まず水平コーン指数の速度特性，および標準と水平のコーン指数の関係を明らかにしておく必要がある。

Fig. 3は速度 v と水平コーン指数 C_h の関係を示したものである。図から明らかなように，v=0.2～2.8 m/sの範囲では，水平コーン指数は速度にほとんど影響されない。WISMER等[3]は飽和粘土で同様な実験を行ない，1 m/sの速度まではコーン指数が増加するが，1～3 m/sの範囲ではほぼ一定との結果を得ている。土壌条件が異なるので厳密な比較はできないが，両者の差は粘性抵抗の差と考えられる。飽和粘土に比較すると，粘性が極端に低い本実験の場合は，速度に依存する粘性抵抗がほとんど無視できるものと思われる。

Fig. 4に標準コーン指数と水平コーン指数の関係を示した。土壌構造が異なる屋外，屋内圃場における差は認められず，次のような直線回帰式 (F_0=528) を得た。

$$C_h = 0.553 C_s \qquad (1)$$

この回帰係数の値は，II-1節に記したコーン位置の場合である。水平コーンの圃場表面からの深さが変わると，この値も変化するものと思われるが，本実験でのプラウ耕深(15～23 cm)の範囲では，差は認められなかった。

以上の結果より，水平コーン指数を用いて土壌条件を評価することは，標準コーン指数による評価と同等であり，(1)式によって相互の変換が可能なことが明かとなった。

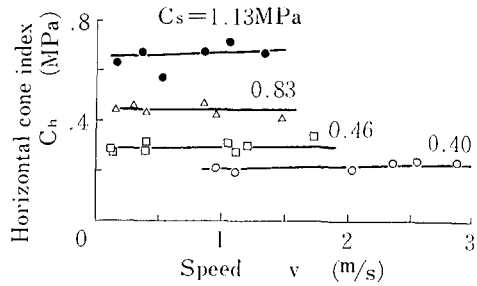

Fig. 3. High-speed test of horizontal cone penetrometer.

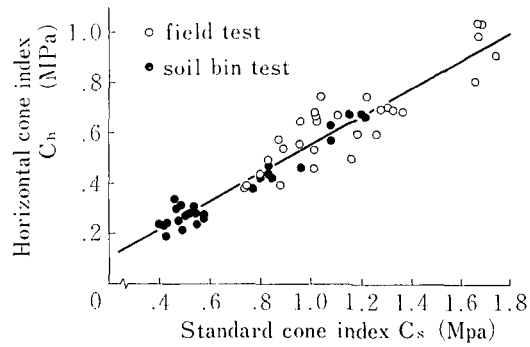

Fig. 4. Relation between horizontal cone index and standard cone index.

2 プラウ牽引抵抗の実験結果

一般にプラウの比抵抗 r_s と作業速度 v の関係は次式であらわされる。

$$r_s = r_0 + \varepsilon v^2 \qquad (2)$$

ここで r_0 は v=0 のときの比抵抗であり，静的な抵抗に相当し，εv^2 は動的な力，すなわち主として土の慣性力を意味している。ε は比抵抗 r_s に対する速度の影響程度をあらわす係数である。SÖHNE[1]の行なった実験では，プラウのはつ土角と土壌条件の影響が ε の値に認められ

るが，土壌条件との関係についての詳しい解析は行なわれていない。

Fig. 5, 6 に本実験における屋内および屋外圃場でのプラウ比抵抗と耕起速度の関係を示す。いずれの圃場においても(2)式で回帰でき，Table 2 に示すように，土が硬くなると，回帰係数 r_0, ε ともに大きくなった。しかしその増加のしかたは r_0 と ε では異なっている。すなわち r_0 は両圃場を通じて水平コーン指数 C_h にほぼ比例しているが，ε は屋内圃場と屋外圃場での差が顕著である反面，屋内圃場での水平コーン指数の増加に対する ε の増加は僅かである。

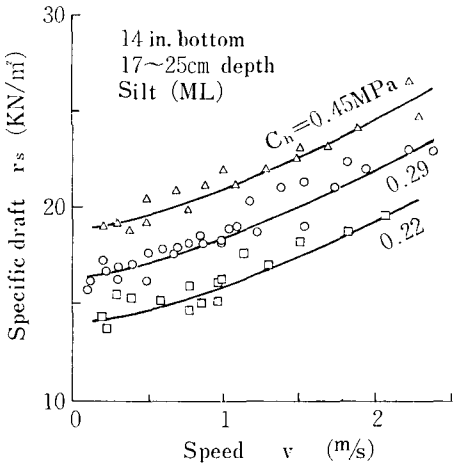

Fig. 5. Effect of speed upon draft force of plow (soil bin test).

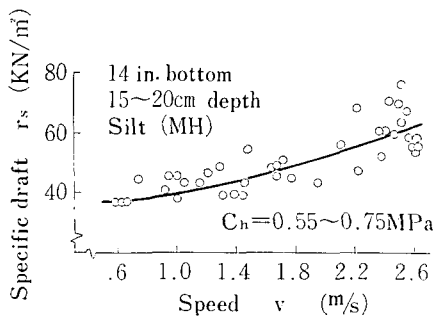

Fig. 6. Effect of speed upon draft force of plow (field test).

Table 2. Regression coefficient r_0, ε

	C_h (Mpa)	r_0 (kN/m²)	ε (kg/1000 m³)
Soil bin Test	0.2	14.4	1.25
	0.3	17.0	1.30
	0.4	19.4	1.42
Field Test	0.65 ～0.75	37.3	3.48

プラウにおける慣性力には，土がプラウによってせん断変形あるいは破壊されるときの，土のすべり速度ベクトルによるものと，耕起されたれき土がはつ土板に沿って反転・放てきされるときの速度ベクトルの変化によるものとがある。

後者による慣性力は厳密にはれき土の軌跡から計算されねばならないが，巨視的にはプラウのはつ土角の影響が大きいものと思われる。したがって，同一プラウ，同一圃場の場合は，土の容積重に依存すると考えてよいであろう。前述した屋内圃場における ε の微増はこの理由によるものと考えられる。

一方，前者による慣性力は，進行方向と土中のすべり面のなす角度 δ，すべり速度 v_s，および土の容積重に依存する。このうち δ および v_s は，進行方向とプラウ面のなす角度，土の内部摩擦角 ϕ，粘着力 c，土とプラウ面との摩擦角 ϕ'，付着力 c'，および土の圧縮性の大小等

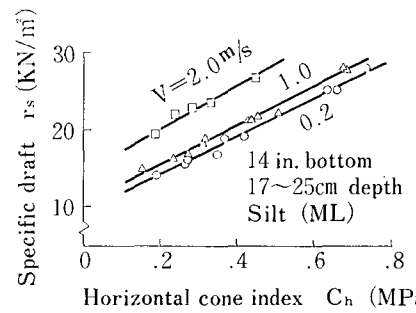

Fig. 7. Relation between cone index and draft force of plow (soil bin test).

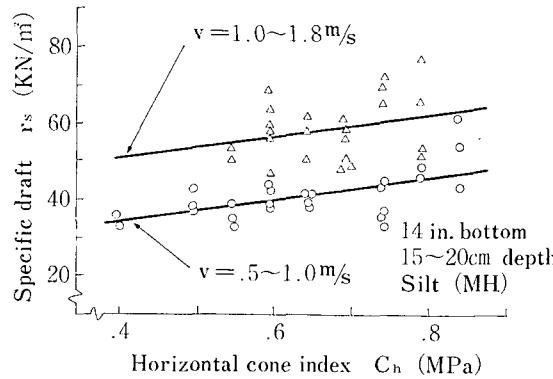

Fig. 8. Relation between cone index and draft force of plow (field test).

の土壌条件によって変化する。これらの土壌条件の違いはコーン指数にもあらわれることは言うまでもないが，FREITAG[5] も報告しているように，一般にはコーン指数から前記土壌条件諸値を一義的に決定することはできない。このことは，前述の圃場の違いによる ε の差が，コーン指数によっては説明できないことを示している。本実験結果から推定すると，各圃場毎に

$$f(\phi, c, \phi', c') = \text{const.}$$

なる関係が存在し，それが ε の構成要素の一つになっているものと考えられる。したがって同一圃場では ε の値に大きな変化はなく，圃場が異なると ε の値が変わるものと理解される。

Fig. 7, 8 は水平コーン指数によるプラウ比抵抗の変化を示したものである。屋外圃場では，自然状態土壌での実験であるため，速度と土壌条件を組織的に組み合わせることができなかった。そのため Fig. 8 では 0.5～1.0 m/s と 1.0～1.8 m/s というかなり広い速度範囲に分けて点をプロットしているが，両圃場とも，ある速度でのプラウ比抵抗は水平コーン指数と直線関係にあるといえよう。このことは前述した r_0 と水平コーン指数の関係を示唆するものである。

3　プラウ牽引抵抗の次元解析

前節で考察したように，プラウの牽引抵抗に影響する土壌条件は，コーン指数と土の容積重のみでは完全に表現できないが，同一圃場に限定した場合には，この2つの量で土壌条件を代表できることがわかった。本節では，同一プラウ同一圃場でのプラウ比抵抗 r_s，標準コーン指数 C_s，土の容積重 ρ，耕起速度 v の間の関係式を次元解析により求め，その式を実験値により検証する。

いま，長さ，質量，時間の次元をそれぞれ L, M, T として，求める関係式に関する次元マトリックスをつくると，

$$\begin{array}{c} \\ L \\ M \\ T \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} r_s & C_s & \rho & v \end{array} \\ \begin{bmatrix} -1 & -1 & -3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ -2 & -2 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{array}$$

この次元マトリックスからつくられる3列の行列式はすべて0となるので，この次元マトリックスのランクは2である。したがって，もとめる関係式は次に示すような2つの無次元積であらわされる。

$$\Phi(r_s/C_s,\ \rho v^2/C_s) = 0 \qquad (3)$$

本実験におけるこれらの無次元積の関係は Fig. 9 に示すように屋内，屋外圃場ともに，次の直線式で回帰できた。

$$\frac{r_s}{C_s} = a + b\frac{\rho}{C_s}v^2$$

すなわち

$$r_s = aC_s + b\rho v^2 \qquad (4)$$

ただし標準コーン指数 C_s は水平コーン指数 C_h から (1)

Table 3. Regression coefficient of equation (4)

	Regresson Coefficient		95% Confidence interval	
	a	b	a	b
Soil bin	0.0319	1.087	±0.00110	±0.524
Field	0.0320	3.563	±0.00177	±0.425

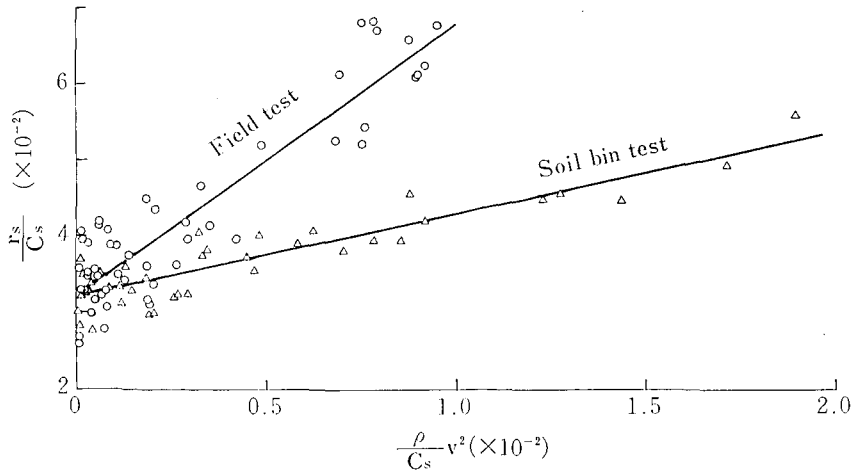

Fig. 9. Dimensional analysis on Draft force of Plow.

式により換算したものである。また(2)式と(4)式より，

$$r_0 = aC_s \qquad \varepsilon = b\rho$$

であるのは明かである。得られた回帰係数を Table 3 に示すが，a は圃場が異なっても変化せず，b は圃場が異なると明らかに別の値をとる。前節の考察と考え合わせると，a はプラウに固有の定数であり，b は ϕ, c, ϕ', c' およびプラウの幾何的構造（主にはつ土角）によって定まるものと考えられる。したがって特定のプラウと圃場の組合せでは，数回の試験により，a, b を決定することにより，圃場の土壌条件が変わっても，標準コーン指数と土壌容積重からプラウの牽引抵抗を推定することができる。

IV 摘　　要

土の貫入抵抗とプラウの牽引抵抗についての関係を明らかにし，プラウ抵抗のアナログとしてコーンペネトロメータが使用可能か否かを検討するため，水平コーンペネトロメータをプラウの横に取り付け，2種類の圃場で実験を行った。結果を要約すると以下の通りである。

1. 水平コーンペネトロメータによる水平コーン指数 C_h と通常のペネトロメータによる標準コーン指数 C_s の間には，

$$C_h = 0.553C_s$$

の関係が成り立ち，速度 v は 0.2～2.8 m/s の範囲では，C_h に影響を与えない。

2. 土の容積重を ρ とすると，プラウの比抵抗 r_s は

$$r_s = aC_s + b\rho v^2$$

であらわすことができる。a はプラウに固有な定数であり，b は，コーン指数では表わすことができない圃場に固有な値と，プラウの幾何的構造により定まる定数と考えられる。

3. コーンペネトロメータはプラウのアナログとしては完全ではないが，同一プラウ同一圃場においては，コーン指数と容積重により，プラウ牽引抵抗に影響する土壌条件を表わすことができ，これによりプラウの牽引抵抗の推定が可能である。

引 用 文 献

1. 端　俊一： モデルプラウの6分力測定，農業機械学会第38回総会講演要旨，31, 1979
2. 李　明珠他： L型6分力計の試作に関する研究，三重大学農学部学術報告，第64号，69–80, 1982
3. WISMER, R. D. and H. J. LUTH: Rate Effects in Soil Cutting, Journal of Terramechanics, 8(3), 11–20, 1972
4. SÖHNE, W.: Anpassung der Pflugkörperform an höhere Fahrgeschwindigkeiten, Grundl. Landtech., Heft 12, 51–62, 1960
5. FREITAG, D. R.: Penetration Tests for Soil Measurements, Trans. ASAE, **11**(6), 750–753, 1968

Summary

Ordinarily, in the tests of tillage tools, the cone index that obtained by the cone penetrometer has been used in order to only express the soil conditions. However, the role of a cone index should be the analog of tillage tools.

From this view point, the present work was conducted to elucidate the relation between the draft force on the moldboard plow and the penetration resistance of soils, and moreover to investigate whether the cone penetrometer can be or can not be used as a analog of draft force on the moldboard plow.

In order to achieve these purpose, the horizontal cone penetrometer was attached to the side of the plow bottom. And the experiment was conducted in two kinds of field. The results obtained was as follows:

1. The relation between the horizontal cone index "C_h" and the standard cone index "C_s" is:

$$C_h = 0.553C_s$$

"C_h" was not affected by the penetration speed in the range of 0.2～2.8 m/s.

2. In regard to the specific draft of plow, following equation was obtained.

$$r_s = aC_s + b\rho v^2$$

where r_s: specific draft of plow
ρ: unit weight of soil
v: plowing speed

It is conjectured that "a" is the constant determined by the characteristics of the plow, and "b" is the constant determined by the geometry of the plow, and by the field characteristics which can not be explained by a cone index.

3. The cone penetrometer is not a perfect analog of a plow. However, in the same plow and the same field, the cone index and the unit weight of soil can explain the soil conditions which affect to the draft force of plow. Therefore the draft force of plow can be estimated by the above equation.