

土壌塑性変形に関する研究 — シリンダ内土壌の糸による垂直変形計測 —

大友功一・谷口哲司・岸本 正

(受理：1998年11月30日)

Research on soil deformation

— Measuring vertical deformation of a cylindered soil with strings —

Koh-ichi OHTOMO, Tetsuji TANIGUCHI, Tadashi KISHIMOTO

摘 要

土壌変形計測技術の確立を目的とする組み立て式シリンダを開発した。変形計測にはまずシリンダに取りつけたガイドと針で糸グリッドをシリンダ内調製土壌に20mm間隔で複数設置し、表面から変形を加える。次にシリンダを半分に分解して定量化する。糸グリッドの設置精度および3種の直径の異なる円形載荷板を供試し、変形計測実験を行った。その結果は以下に要約される。

1. グリッドは直線状、折れ線状およびオフセット状に設置された。
2. 理想グリッドとのずれは最大で3.0mm、標準偏差は0.34mmであった。
3. 糸グリッドの設置精度を上げるにはガイドの改良を必要とする。
4. 垂直方向の変形を定量化し、変形特性の解析を可能とした。
5. 今後2次元の変形解析はグリッドにビーズなどを用いることを提案した。
6. 載荷板により変形深は異なることを明らかにした。

キーワード：土壌変形，塑性変形，糸グリッド

緒 言

農用トラクタを利用することから発生する踏圧問題は車輪が多年にわたり土壌を踏み固めることにある。その結果土壌密度を高め、孔隙の減少は透水性あるいは通気性を悪くする。このことが土壌環境の

悪化に結びつき、結果として農業に悪影響を与えることが踏圧として憂慮されている。その一解決方法として、トラクタ利用法においてトラクタ走路を固定するCTすなわちコントロールドトラフィック¹⁾がある。十勝にはまだCTの導入はなされていないが、効果は十分に期待できるシステムである。今後

帯広畜産大学畜産環境科学科 〒080-8555 帯広市稲田町

Department of Agro-Environmental Science, Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine, Inada-cho, Obihiro-shi 080-8555, Japan

このシステムの導入検討を行なう一方で、従来のトラクタ利用法は継続されるので農業にとって致命的な踏圧とならない車輪と荷重に関する指針作成が急務とされる。それには土壌の変形を的確に詳細に把握する計測技術の確立が研究を大きく前進させるとして、土槽調製後の土壌を乱すことなく複数の糸グリッドを設置し、土壌の垂直方向の変形計測を実現する新技术を開発した。その結果車輪および土壌条件から土壌の変形が及ぶ深さすなわち踏圧深を推定することを実現した⁹⁾。

一方土槽はある程度間隔があり、その中の土壌に糸グリッドを完全に平行に設置するのは難しく、未解決な技術として残されていた。しかし、シリンダすなわち円筒などの比較的狭い空間では実現可能との観点から、この問題に挑戦し、シリンダ内の土壌の変形計測を実現することに成功した⁹⁾。

本研究ではさらに大きなシリンダ内の土壌に平行に、できるだけ間隔を詰めて複数の糸グリッドを設置する技術を確認するべく研究を開始し、敷設した糸グリッドの設置精度を検討し、変形計測を実現した。さらに土槽に糸グリッドを設置する可能性を展望させる技術的見通しができたので報告する。

実験装置

1. 計測用シリンダ

図1に試作供試した計測シリンダの断面を示す。

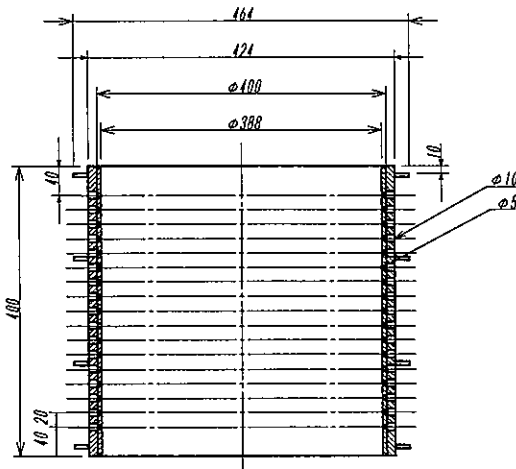


図1 土壌変形量計測用シリンダ断面

外径400mm、長さ400mm、肉厚6mmの鉄製シリンダの壁に沿って、上端から40mmの位置を起点として20mm毎に直径5mmの穴を垂直に17個、両側に明けた。中心から34mm離して縦割にし、穴がある半切の両切口の外側に穴と中心を合わせ帯鋼を溶接した。帯鋼にはシリンダに明けた穴の中心と一致するように直径10mmのめねじをたてた。それぞれ切口近くに4ヶのヒンジを取りつけ、長い2本のピンをそれぞれ通すことでシリンダを組み立てることができるようにした。帯鋼のネジ穴はシリンダの対壁の穴に手前から針を通すガイドを固定するために用いる。ガイドは中心に2mmの穴を持つ長さ112mmの鉄製丸棒である。片側をおすねじとし、ねじ込んで使用する。

2. 変形計測装置

土壌変形量の計測には図2に示すXYの2次元変形計測装置を供試した。変形を加えた土壌を削り、糸が露出されたシリンダはX軸と直角にシリンダ台に寝かせて置かれる。リニアガイドからなる計測台は直径20mmの軸からなる2本のガイドで支えられている。移動用ハンドルが取り付けられた送り軸はねじ加工仕上げで、ハンドルを一回転させると計測台はX方向に5mm移動される。

Y方向の変形量はリニアガイドスライダに取りつけたレーザアナログセンサと距離測定針で計測する。手動リングを回転し、スライダ上の測定針を糸の中心に合わせるとレーザセンサはレーザ反射板との距離を電圧に変換する。この電圧を12bitの分解能でA/D変換し、変形計測データとしてコンピュータに収集される。

3. 土壌

土壌は恵庭系火山灰土を用い、国際土壌学会法による分類区分では砂質埴土である。長期間にわたり自然乾燥させ、2mmのふるいを通し、その後飽和状態まで加水した。その状態で一昼夜以上放置したのち室内に広げ、自然乾燥による水分調製を行なった。実験に供試した土壌の水分は平均41.2%、密度は平均1.40t/m³であった。

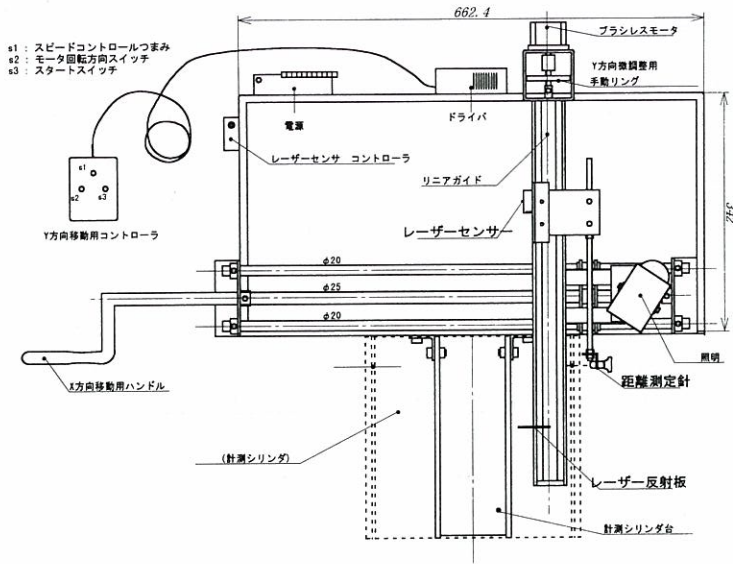


図2 土壌変形量計測装置

実験方法

1. 糸グリッドの設置

図3に実験装置を示す。実験では等量の土を4回に分けてシリンダに詰め、油圧シリンダに取りつけた円形板で土を締め固めるとき、毎回圧縮高さを制御し、同じ密度となるようにした。土詰完了後、ガイドを取りつけ、直径2mmの真直なピアノ線の針をガイド穴から対壁の直径5mmの穴に向けて突

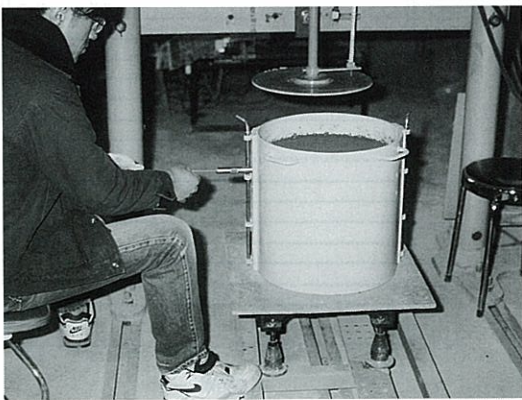


図3 土壌変形量計測実験装置

き刺す。貫通しないときは反対側から、同じように針を貫通させ、同じようにして最下部まで先穴を設置して作業を終了する。

次に直径2mmの綿糸を針につけ、それを先穴に通して糸グリッドの設置を完了する。シリンダ上部まで土壌を詰めることが困難であったが、少なくとも14本の糸グリッドを設置することができた。

2. 土壌の変形と計測

糸グリッドを設置した土壌の中央部に、鉄製円形載荷板で変形を加える。載荷板は油圧シリンダで垂直に貫入され、その速度はおよそ10mm/sの低速とした。本実験ではシリンダに使用可能な最大直径に172mmを設定し比較対象に140および80mmの載荷板も供試した。次に変形計測には両側のピンを抜き、シリンダの片側を取り除き、糸の半分が露出するまで土を削りとり、シリンダ台に固定する。

削りだした土壌断面は側部が多少崩れるので、シリンダ内壁から14mm内側に計測基準点を設定した。基準点からX方向に送り軸一回転毎、すなわち5mm毎に、シリンダ頂上下70mmの位置から糸の中心部までの距離を計測した。グリッド一本につき合計71点を計測し、糸の変形を土壌の変形として計測を進める。

実験結果及び考察

1. 糸グリッド設置精度

糸グリッドの設置はガイドで388mm先の直径5mmの穴に向けて貫通するように少しづつ針を送り込む。土中を針が直進するものとして、ガイドから先に許される勾配は 6.4×10^{-3} 以内で、土中を進む過程で針を曲げるような不均一な応力が発生することをできるだけ避ける必要がある。ここでは2mmのふるいを通すことで、土壌中の針の直径より大きな固まりを取り除き、比較的均質な土壌とした。

予備実験を含め、通算174回のグリッド設置作業を行なった。一回で貫通する率は44%と50%を下回った。一度で貫通しない場合は、反対側から同じように針を挿入することで、100%の確率で先穴をつけることができた。一回目で貫通させることに失敗した理由として、穴を空けたガイドで誘導するシステムに原因があると考えられる。すなわちガイドの中を針が滑らかに通るには針の直径に対して0.3mm程度の大きな穴を必要とする。この直径ががたとなり、針がガイドを出たときに押し加減で最大で 3.0×10^{-3} の勾配で針先が振れている可能性がある。土中の不均一な応力の発生が伴って、一度で貫通する確率が低くなったと推察している。

次に糸グリッドの設置精度を検討するために、グリッド15本設置後、直ちに削りだし、その位置を計測する実験を2回反復した。それぞれ精度実験1, 2として、後述する理想グリッドとのずれを検討した。図4に精度実験2で計測した設置グリッドの断面を示す。計測点は糸の中心を示し、破線がシリンダに明けた5mmの穴の中心を示す。この破線を理想グリッドとし、この線上にグリッドを敷設することを理想としている。

解析の結果、糸グリッドの設置状態は、頻度は別として直線状、折れ線状、オフセット状の3パターンにはほぼ分類された。この中で折れ線状は両側から針を通した結果としてこのパターンが発生するのは予想されたところである。図4のグリッドNo.14, 15の設置状態がオフセットの例で、全体が理想グリッドに対して、ほぼ平行にずれていることを意味し、現在のところその発生原因を検討中である。

表1に精度実験1, 2の解析結果を示す。グリッ

ド一本につき標本数は計測点の71である。理想グリッドからの最大のずれは精度実験2のグリッドNo.15の3.0mmであった。また各グリッド毎に求めた標準偏差の最大値は実験1のグリッドNo.11の0.8であった。なお解析の都合上、理想グリッドの位置は70mm移動してあるので図とは異なる位置を起点としている。全データに対する標準偏差は0.34であった。更に設置精度を上げるためにリニアブッシュなどを用いた精巧なガイドシステムを開発中である。完成とともに長いグリッドの設置技術は土槽での研究をより緻密なものとする。

2. 土壌変形計測

3種類の円形載荷板で中央部に上から変形を加えた土壌の変形計測結果を図5, 6, 7に示す。載荷板で加えた垂直変形量は大きな方からそれぞれ46, 47, 48mmであった。なお図の外枠はシリンダの断面を示す。縦軸がシリンダの頂上からの土中深さを、横軸が計測基準点からの距離である。既に述べたように点が糸の中心部を、破線が理想グリッドを示す。

土壌表面から加えた中央部分の変形は次第に下層部へと伝播する様子を糸グリッドは的確に捉え、可視化と同時に垂直変形の定量化と変形特性の解析を可能にした。深さと共に変形は減少し、左右に拡大していく過程がはっきりと認められる。

糸グリッドによる変形解析の一環として、シリンダ中央部の土壌の変形量を次のように処理した。大

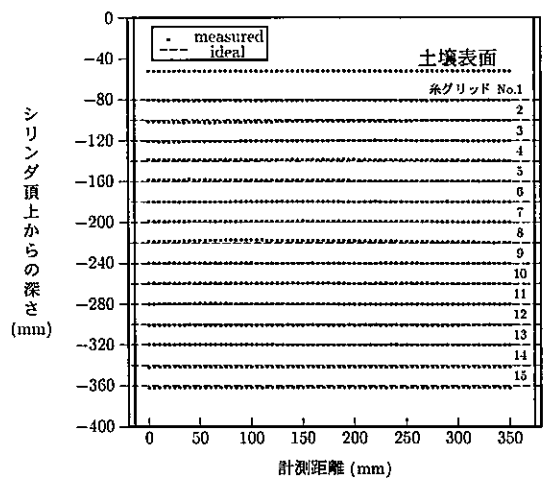


図4 グリッドを設置した土壌の断面

表1 糸グリッドの設置精度の解析結果

精度実験 1

Grid No.	I-grid (mm)	M-grid (mm)	Max (mm)	Min (mm)	SD (mm)
1	10	9.9	10.3	9.6	0.2
2	30	29.0	30.0	28.3	0.4
3	50	49.8	50.4	49.3	0.2
4	70	69.6	70.2	69.1	0.3
5	90	90.1	90.5	89.8	0.2
6	110	110.7	111.4	110.0	0.3
7	130	130.5	131.7	129.5	0.6
8	150	148.9	150.6	148.0	0.6
9	170	169.7	171.1	168.6	0.5
10	190	191.4	192.1	190.3	0.4
11	210	211.1	212.7	210.2	0.8
12	230	231.5	232.7	230.7	0.5
13	250	250.5	251.1	249.9	0.3
14	270	271.8	272.1	271.4	0.2
15	290	291.0	291.7	290.0	0.5

精度実験 2

Grid No.	I-grid (mm)	M-grid (mm)	Max (mm)	Min (mm)	SD (mm)
1	10	11.7	12.0	11.3	0.2
2	30	32.1	33.2	31.4	0.6
3	50	51.3	52.2	50.7	0.4
4	70	69.8	70.6	69.5	0.3
5	90	89.9	90.5	88.9	0.5
6	110	110.7	111.0	110.5	0.1
7	130	130.0	130.7	129.5	0.3
8	150	149.2	150.9	148.2	0.7
9	170	170.9	171.1	170.7	0.1
10	190	190.5	190.9	190.2	0.2
11	210	210.7	211.0	210.2	0.3
12	230	231.4	231.4	231.2	0.1
13	250	250.7	250.9	250.5	0.2
14	270	272.6	272.9	272.5	0.1
15	290	292.5	293.0	292.3	0.1

I-grid : 理想グリッド位置
 M-grid : 糸グリッド位置の平均値
 SD : 標準偏差

友⁹⁾の解析法に従い踏圧深を求め、横軸に土壌表面からの距離を計測深とし、踏圧深までの変形量を縦軸にとり図8に示した。変形のおよぶ深さすなわち変形深は載荷板により異なり、さらに図に示すようにA, B, Cの異なる変形領域があることを予想させる傾向が見られる。B, Cは従来から捉えている変形特性であるが、Aで示す数点からなる直線的な

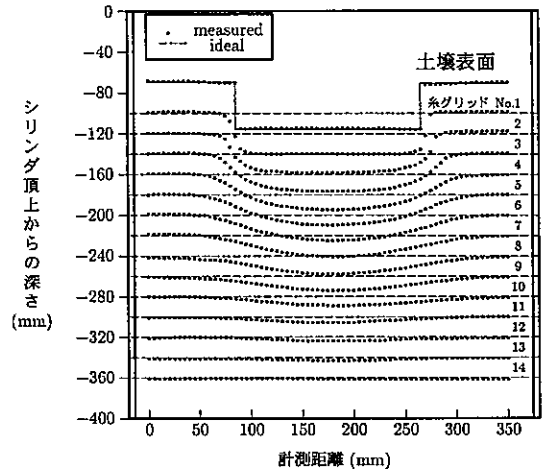


図5 円形載荷板で変形した土壌の断面 (円形板直径172mm)

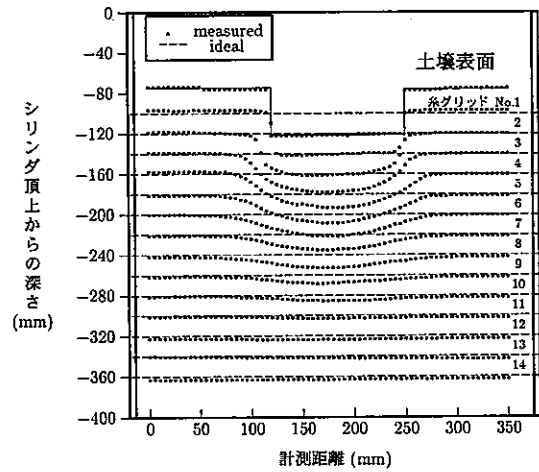


図6 円形載荷板で変形した土壌の断面 (円形板直径140mm)

変形はこれまでの土槽実験³⁰⁾では観測されなかった傾向で今後の研究課題としたい。

今後図9に示す等変形曲線から載荷板による変形領域における差異の検討、グリッド間の差を求めることで縦ひずみの解析あるいは供試土壌では横変形が小さいので変形後の密度の分布の解析を可能とする。現在、有限あるいは境界要素法による小領域で

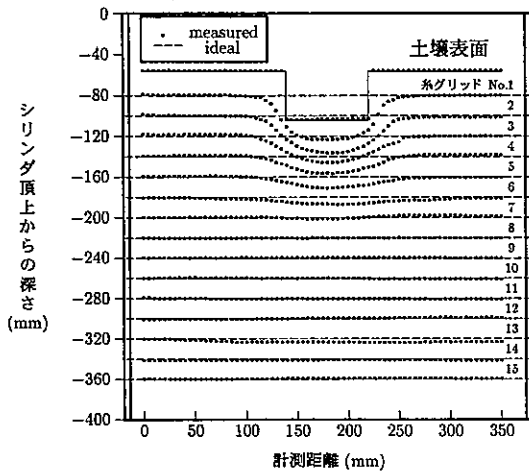


図7 円形載荷板で変形した土壌の断面
(円形板直径80mm)

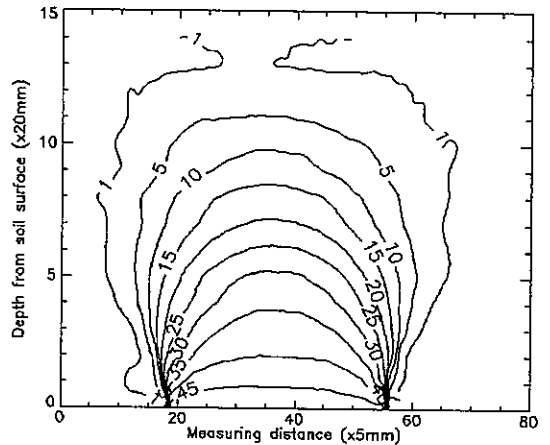


図9 土壌変形量の等高線図

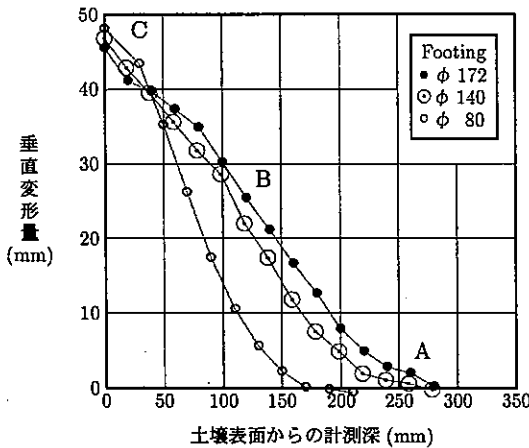


図8 圧縮土壌の中央部垂直変形量

の変形予測を検討している。それには2次元変形予測を可能とするために、グリッドにビーズを用いることを検討している。その結果、厳密な土壌変形のシュミレーションを可能とし、土壌変形を原因とする踏圧などの諸問題の解決の一助となる。

謝 辞

農業動力学研究室出身の三好裕司氏には新技術の確立に多大なご協力を頂いた結果、この研究発表に至った。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Neale, T. J., and Tullberg, J. N., Controlled Traffic in Lucerne Hay Production, Conference on Engineering in Agriculture and Food Processing, Paper No. SEAg96/097, Australia, 1996.
- 2) Tullberg, J. N., Wheel Traffic Effects on Cropping Energy, Conference on Engineering in Agriculture and Food Processing, Paper No. SEAg96/098, Australia, 1996.
- 3) 大友功一・高川清美・谷口哲司・岸本 正, 車輪踏圧による土壌の垂直方向塑性変形について, 帯大研報14: 185-193, 1985.
- 4) 大友功一, 車輪踏圧に関する基礎研究—多水分土壌の踏圧深—, 帯大研報15: 245-254, 1987.
- 5) Basnet, B. B., Ohtomo K., Tullberg, J. N., and Gupta, M. L., Visualisation and Characterisation in the Laboratory using String-Grid Technique, Conference on Engineering in Agriculture and Food Processing, Paper No. SEAg96/099, Australia, 1996.

Summary

A newly developed cylinder which consists of two semi-cylindrical components was used to establish the measuring system for soil deformation. Strings are built into as a grid under the compacted soil in the cylinder at the 20mm intervals with a needle sliding on a guide. The soil is deformed with footings at the center of soil surface in the cylinder by a hydraulic system. One piece of the components is removed and the soil is scraped off till the deformed string grid. The vertical deformations of the strings are measured. The difference between the measured and the ideal position is computed to check the accuracy of string positioning. Experiments were conducted to investigate the behaviors of the soil deformed with three circular footings which are different in diameter. The results are summarized :

- (1) String grids were set with three types as straight, hooked and parallel.
- (2) The maximum difference between the ideal position and the built-in position of strings was 3.0mm and standard deviation was 0.34.
- (3) Improvement in the guiding system of the needle and string is essential to obtain more precise grids.
- (4) The results revealed the feasibility of characterizing the soil deformation with the measuring system.
- (5) Grids with strings of beads were recommended to use for the measurement of two-dimensional soil deformation.
- (6) Three types of footings caused different soil deformation at each string.

Key words : Soil deformation, plastic deformation, string grid.