

SR-2型土壌抵抗測定器による土壌剪断抵抗測定法の検討

唐橋 需*・三竿善明*

平成15年7月1日受付

*鳥取大学農学部生存環境学講座

Investigation of Method for Measuring Soil Shearing Resistance by Using SR-2 Type Soil Resistance Measuring Instruments

Motomu Karahashi* and Yoshiaki Misao*

**Department of Environmental Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori
680-8553, Japan*

SR-2 type soil resistance measuring instruments have been used from about 1965 in Japan as measuring tools for field use to measure soil dynamic values. But the SR-2 type method for measuring soil shearing resistance, which has the outer diameter of 100 mm, the inner diameter of 60 mm and the height of vanes of 10 mm and takes the half of shearing torque as the shearing resistance in the bottom of annulus, neglects the side effect. Therefore, various discussions have been done. This study made it clear that the effect of annular inner side was extremely small because the soil was pushed up and broken out and the effect of annular outer side was pretty large because both the ratio of its area and the radius of outer side were fairly large and shearing was brought about. This side effect appeared larger in cohesion (the ratio of 1.83 ± 0.48 to the control) than in internal friction angle. And also, this study presents such method for improving without harming the feature of SR-2 type as measuring tools for field use as that it is most suitable to cut away previously the outer side of annulus with a cutter knife.

(Received July 2003)

*Key words: cohesion, internal friction angle, soil shearing resistance,
SR-2 type measuring instruments*

結 言

農業機械の作業性能や走行性は、土壤が有する多様な物理性に支配される場合が多い。このため、農業機械の研究では土壤の物理的性質（土壤物理性）を知ることが重要になるが、とりわけ、牽引抵抗や破壊抵抗、あるいは、牽引力や走行抵抗の基となる土壤抵抗が重要であることから、力学的見地における土壤物理性（土壤の力学性）を知ることが必要となることが多い。

SR-2型土壤抵抗測定器は、農業機械の走行可能性及び作業機の抵抗を予知するために使用するもので、円錐貫入抵抗、矩形板沈下量、剪断抵抗及び摩擦抵抗を測定するための測定器具を1セットにまとめたものであり、何れの測定器も現場（圃場）での測定に適応するものとした点に最大の特徴がある。

このSR-2型土壤抵抗測定器は昭和37～39年にかけて農業機械化研究所（現生物系特定産業技術研究推進機構）により開発され[2]、長い間、圃場条件の測定に広く使用されてきている。しかし、機械による土壤破壊（剪断、破断、切断）の中で抵抗が著しく大きいため最も重要な、圧縮による土壤の剪断抵抗を知るために必要な粘着力及び内部摩擦角を圃場で測定するためのアニュラス（またはリング）測定手法については、確立されたとは言い難い状況が続いている。

そこで、本研究は、SR-2型土壤抵抗測定器によるアニュラス剪断抵抗測定法の問題点を明らかにすると共に、現場（圃場）測定に支障のない程度の測定手法の改良方策を具体化することによって、SR-2型土壤剪断抵抗測定手法を確立しようとするものである。

実 験 方 法

（1）使用機器

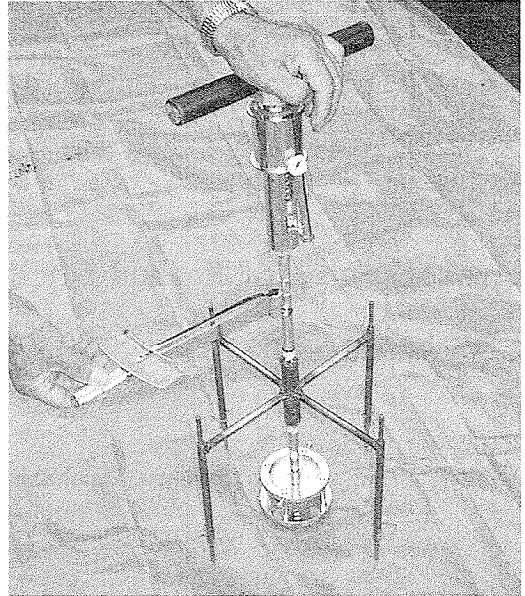
SR-2型土壤剪断抵抗測定器（大起理化工業株式会社製、12枚ベーン式、リング外径10cm、リング内径6cm、ベーン高さ1cm）、ナイフ（刃先長さ30mm、柄の長さ195mm、柄の長径×短径23mm×16mm、質量0.15kg）、リング外周及び内周押さえガイド（質量0.40及び0.32kg）、支持フレーム（4足式）（以上、第1図及び第2図参照）。

（2）実験方法

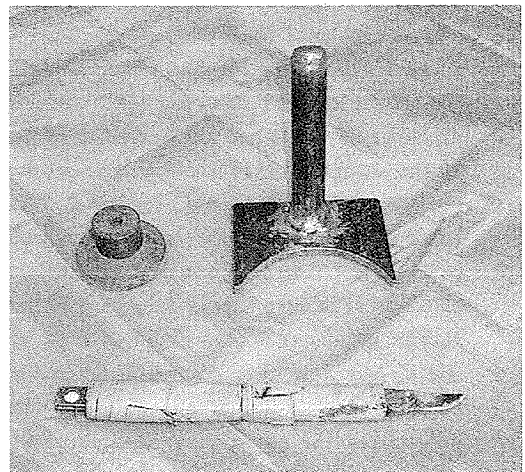
リング周囲の切断処理を行わずにスピンドルの支持具も使用しない従来のSR-2型法、リング外周面の切断のみを行う改良法、及びリング内外周面を切断し、支持フレームを使用する対照法による測定を行う。

（3）土壤条件

未耕起畑（大山黒ボク土及び砂質ローム）の表層と耕盤、並びに、屋外土壤槽（砂、砂質シルト、シルト質粘土及び大山黒ボク土）の表層で測定した。



第1図 支持フレームを付加したSR-2型土壤剪断抵抗測定器



第2図 上段左：リング内周押さえガイド
上段右：リング外周押さえガイド
下段：リング内外周面切断用ナイフ

結果及び考察

(1) SR-2型法による測定状況

SR-2型法では、リング（またはアニュラス）の内外周面における土壌の剪断抵抗を無視し得るものとして、リングの内外径値から剪断に要した全トルク値 T (kgf・m) の $1/2$ を剪断抵抗 S (kgf/cm²) とする[3]。しかし、リングの外周面及び内周面における剪断抵抗がリング底面における剪断抵抗と同じであるとするならば、次式に見られるように、リング内外周面、特に外周面における剪断抵抗はかなり大きくなると考えられる。

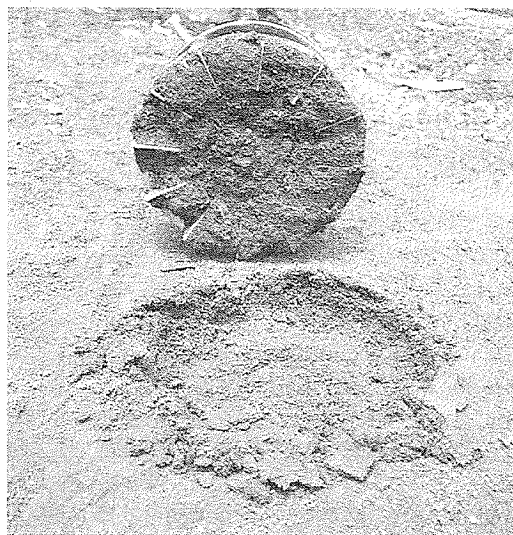
$$\begin{aligned} T \times 100 &= \int_{d/2}^{D/2} (2\pi r S) r dr + \pi D h S \times \frac{D}{2} + \pi d h S \times \frac{d}{2} \\ &= \frac{2}{3} \pi S \frac{D^3 - d^3}{8} + \frac{1}{2} \pi D^2 h S + \frac{1}{2} \pi d^2 h S \\ &\approx 200S(1.03 + 0.77 + 0.28) \end{aligned}$$

ただし、 $D=10\text{cm}$ 、 $d=6\text{cm}$ 、 $h=1\text{cm}$

実際にSR-2型土壌剪断抵抗測定器で20kgfの加重条件下で測定した時の土壌の破壊状況の一例を第3図に示す。これから分かることは、リングの外周面では明らかに剪断破壊が起こっていること、及び内周面では土壌が浮き上がって剥離しつつリングの内周に付着して共回りしていることである。したがって、リングの底面積に対する外周面積の比率及び回転半径の大きさから考えてリング外周面が剪断抵抗に及ぼす影響(側面効果)は、かなりの程度大きくなると思われる。岡田ら[1]は、剪断円筒面に伝わる圧力はそれほど大きくないと考えて、側面効果は小さいとした。一方、吉村ら[6]の研究結果を解析すると、SR-2型においてペーンの高さを4mmにすれば側面効果を十分小さくすることができると考えられる。また、リング内周面の影響については、剪断ではなく、破壊エネルギーの著しく小さい破断が起こっていることと、回転半径が小さいことから、著しく小さくなると思われる。

このため、本研究では、SR-2型法に対しリングの外周面に予め切断を加える方法を改良法として、圧力(測定器自重+加圧力/リング底面積)と剪断抵抗(測定トルク値/2)の一次回帰直線から得られる粘着力 C (kPa)及び内部摩擦角 ϕ (°)について比較検討することとした。また、リングの底面における剪断抵抗のみを可能な限り正確に測定するために、リングの外周面及び内周面を予め切断すると共に、SR-2型法では剪断抵抗が大

きくなってトルクレンチにかかる力の増大によりスピンドルとリングの回転中心の移動が生じやすいので、スピンドルに対する支持フレームを付加して測定する方法を対照(または基準)法として、SR-2型法及び改良法との比較検討を行うこととした。

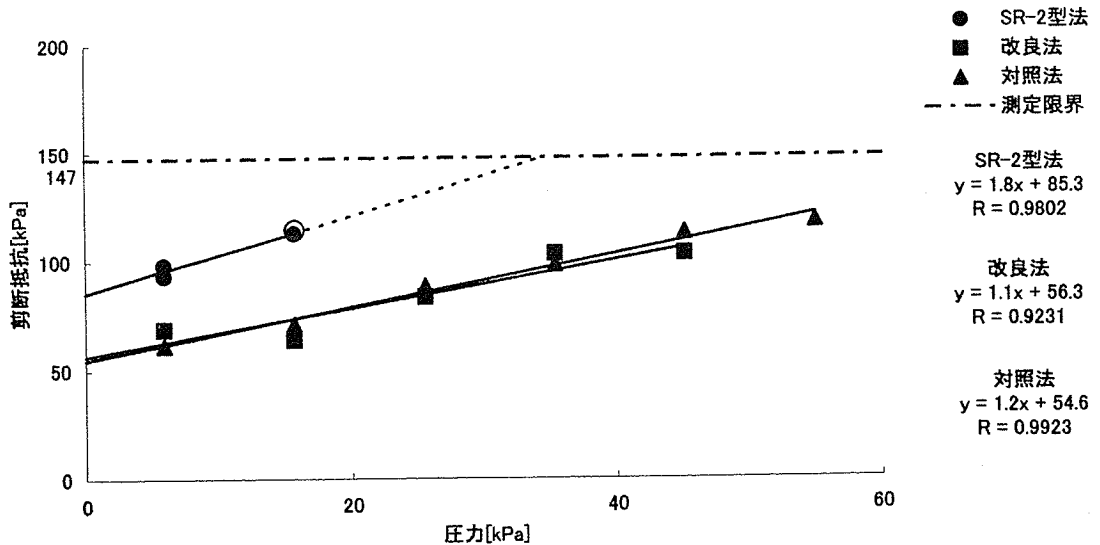


第3図 SR-2型土壌剪断抵抗測定器による土壌の破壊状況の例

著しく固い土壌条件(黒ボク土畑の耕盤)における3種類の法による測定例を第4図に示す。この図における各回帰直線の y 軸上の切片が粘着力 C (kPa)であり、傾きが内部摩擦角 ϕ (°)になる。一般に、測定箇所の微妙な土壌条件の違いによる剪断抵抗測定値の変化が大きいと感じられ、相応に高い相関係数が得られるようにするためには、測定の繰り返しを必要とすることが多い。このため、3種類の法間の比較(粘着力 C では対照法に対する比率、内部摩擦角 ϕ では対照法との差)はかなり変動の大きい結果となり、特にSR-2型法では変動が一般に大きかった。また、図4からも分かる通り、SR-2型法では剪断抵抗が大きいために、測定限界(トルクレンチの目盛は230kgf・cmまで、目盛を延長して最大300kgf・cmまで可能)が固い土壌条件の場合に早く到来することになる。

(2) 粘着力

平成10、11、14、15年度の4年間に測定した結果を一括して検討する。測定地点の土壌条件としては、土壌の種類、硬度(山中式及びSR-2型小コーン貫入抵抗)、密度、含水比等を調査した。3種類の測定法間の



第4図 3種類の方法による実測例

(黒ボク土畑の耕盤、山中式硬度 50.7 kgf/cm²、SR-2型小コーン硬度 11.1 kgf/cm²)

差違に対する検討方法として、粘着力については対照法に対するSR-2型法及び改良法の比率を取ると、土壌の種類との関係は認められず、密度及び、特に含水比の影響を強く反映する土壌硬度を基準にして比較検討するのが最も適当と考えられた。また、地表面の土壌硬度の測定方法としては、山中式硬度計の使用の方がSR-2型小コーン貫入式硬度計よりも良いと思われる。

4年間の土壌剪断抵抗の測定結果から、土壌硬度(山中式、SR-2型においてもほぼ同様)と粘着力Cの比率との関係を見ると、第5図のとおりである。これから以下のことが知られる。

Cの比率は、土壌硬度との間に関係が認められない(SR-2型法及び改良法の場合のCの比率と土壌硬度との間の相関係数は0.0624及び0.2895である)。

SR-2型法では、Cの比率が平均±標準偏差(変動係数)において1.88±0.50(27%)となり、対照法に比較して粘着力が平均して約1.9倍にも大きく求められ、また、変動がかなり大きい。このCの比率の平均値1.88は、剪断抵抗がリング底面でも側面(ペーンの高さ1cm)でも同じとした時のリング外周面効果の計算値1.77と比較的よく近似している。このようなCの比率と変動の大きさから、SR-2型法において側面効果を無視することは不適當であり、また、SR-2型法による測定値に修正係数(この場合には0.53)を乗じて推定することには無理があると考えられる。

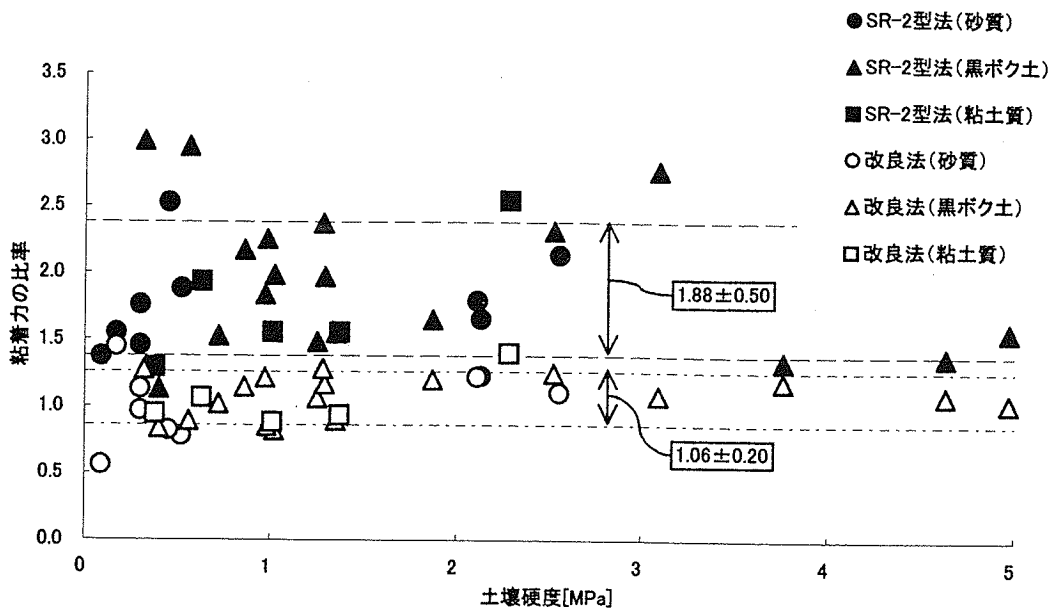
改良法では、Cの比率が1.06±0.20(19%)で、対照法と同程度か僅かに大きめの粘着力が得られる可能性があるが、現場(圃場)測定の精度から考えると対照法とほぼ同じ粘着力を測定し得ると考えて良いと思われる。

(3) 内部摩擦角

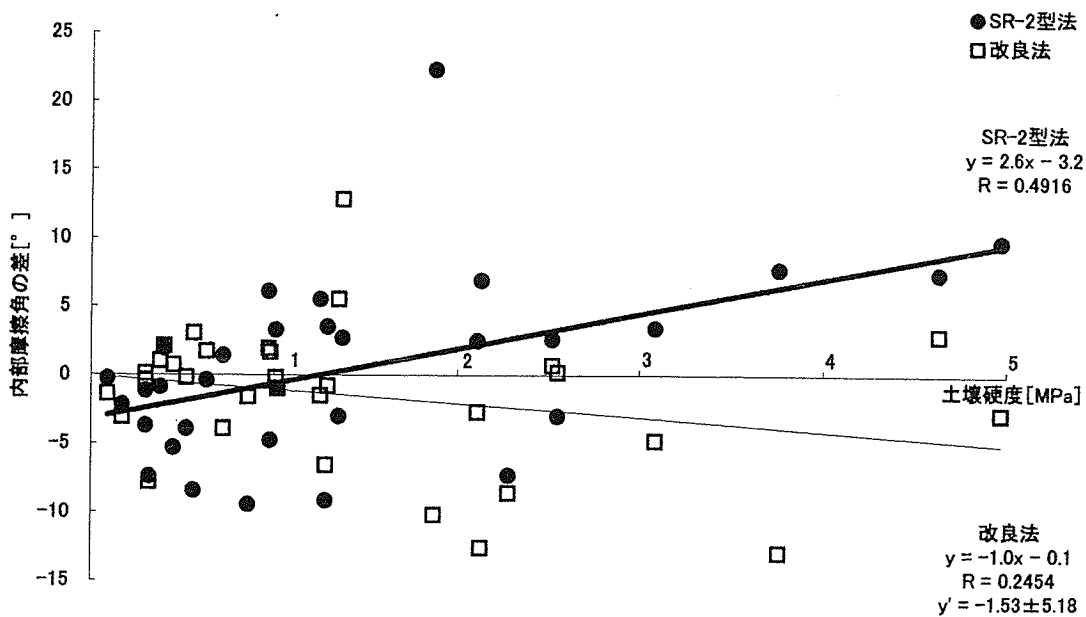
対照法に対するSR-2型法及び改良法による内部摩擦角φの差をとって土壌硬度(山中式、SR-2型でもほぼ同様)との関係を見ると、第6図のとおりである。これから、次のことが知られる。

SR-2型法では、全体としては比較的小さい相関度であり、概ね7°程度以内の差であるが、土壌硬度の大きい領域(約2.5MPa以上)ではかなり大きな相関度($r=0.8733$)が認められる。また、土壌硬度がかなり小さい条件では内部摩擦角が対照法より小さくなることもある。この傾向は、土壌硬度が大きいと横方向への圧力の分散が増大して剪断抵抗(側面効果)が増大する(傾きが増す)ためと考えられる。ただし、土壌硬度が小さい時にSR-2型法は対照法より小さい内部摩擦角になることが多い理由としては、圧力の増大に伴って主に沈下が起こって側面効果が減少する(剪断抵抗線図の傾きが対照法より小さくなる)こと等が考えられる[5]。

一方、改良法の場合には、全体としてはかなり小さい相関度であり、ほぼ対照法と同程度の内部摩擦角(φの差=-1.5±5.2)を測定できると思われるが、土壌硬度が



第5図 土壌硬度（山中式）と粘着力の比率



第6図 土壌硬度（山中式）と内部摩擦角の差

比較的大きい条件では対照法より小さ目の内部摩擦角になることも多くあることが分かる。この傾向は、土壌硬度が大きいと改良法ではリング（またはスピンドル）の中心が移動を起こしやすく、瞬間的に圧力が低下しやすいたことが原因として考えられる[5]。ただし、概ね7°程度以内の差であるので、もともと変動の大きい現場（圃場）測定条件下では誤差の範囲内と考えても良いと思われる。

したがって、内部摩擦角の測定に対しては、SR-2型法及び改良法共に現場（圃場）測定に伴う比較的大きな変動誤差の範囲内で測定し得ると思われるが、SR-2型法の場合には土壌硬度の大きい場合に内部摩擦角が多少大き目に測定される傾向が見られることに注意する必要がある。

総 括

農業機械による土壌破壊の中で抵抗が著しく大きいために最も重要な、圧縮による土壌の剪断抵抗を予知するために必要な粘着力及び内部摩擦角を現場（圃場）で測定するために、我が国では昭和40年頃からSR-2型土壌剪断抵抗測定器が使用されてきている。しかし、このSR-2型土壌剪断抵抗測定法には、リング（またはアニュラス）の内外周面における抵抗が全体の剪断抵抗に及ぼす影響（側面効果）を無視し得るものとしている点に問題があり、これまで主としてシミュレーション[6]（SR-2型の場合のペーンの高さ10mmを4mmにするのが良いと示唆されている）や室内土壌槽実験[1][4]により、また、一部では圃場測定[2]により検討が行われた。

本研究は、4年間の現場（圃場）測定（ただし、ここでは畑土壌条件について扱い、水田土壌条件については別途検討する）により側面効果の大きさについて検証すると共に、SR-2型土壌剪断抵抗測定法を一部改良して、妥当な粘着力及び内部摩擦角の算出を可能とする現場（圃場）測定手法を確立するために行った。

その結果、内部摩擦角に対してはSR-2型（土壌剪断抵抗測定）法でも圃場測定に伴う大きな変動誤差の範囲内程度と思われる測定になるが、粘着力に対してはSR-2型法では基準（または標準）値の平均1.9（標準偏差0.5）倍にもなること、また、リングの外周面に予めナイフによる切断を加える改良法ではほぼ基準値と同様の値を得られることが知られた。結局、リング内周面の影響は著しく小さく無視し得るが、外周面の影響はかなり大きくなるので、予めナイフ等で外周側面に沿って土壌に切断を加えておくことが必要であり、この程度の改良であれば現場測定法としての特徴を損うところは少

ないと思われる。SR-2型法では剪断抵抗力が大きくなるためにリングの回転中心がずれ易く、また、土壌が固いと測定限界に早く到達してしまうのに対して、改良法であればリングの回転中心の移動を多少は減らせ、また、測定限界をかなり伸ばすことが可能になる。なお、リング外周側面に沿ってナイフで土壌を切断する場合、リング周辺の土壌が引き上げられて乱されないように指先で押さえても良いが、リングの外周に合う湾曲部分を持った鉄製の押さえガイドを使用すると便利である。

参 考 文 献

- 1) 岡田芳一・安部武美：現場式土壌せん断試験機の研究（第1報）-試作機の構造および比較試験、農機誌、28(1)、34-38(1996)
- 2) 唐橋 需・森本國夫・藤井幸人：リング式土壌剪断抵抗測定法の検討、測定・データ処理システムの開発に関する研究（第1報）、農業機械化研究所研究成績60-2、25-34(1986)
- 3) 金須正幸・国府田佳弘・八木茂・瀬山健次：乗用トラクタの走行・牽引および耕耘性能に関する研究、農業機械化研究所研究報告書、8-11(1966)
- 4) 高橋照夫・福地博：せん断リング試験法における付属突起部の土壌定数への影響、農機誌、57(5)、3-11(1995)
- 5) 矢守愛史・三竿善明・唐橋 需・朝来幸子・松尾健太郎・足立純一・戸崎和男：リング式土壌剪断抵抗測定手法の改良-SR-2型土壌剪断抵抗測定器について-、農業機械学会関西支部報、93、46-49(2003)
- 6) 吉村靖生・守島正太郎：土の摩擦応力測定に及ぼすアニュラスの尺度と幾何学的形状の影響(I)、(II)、農機誌、44(2)、44(4)、269-274、599-604(1982)(1983)