

土 壌 の 付 着 性 に つ い て

——毛管力との関係——

秋 山 豊*

1. 序 論

土壌が農器具や衣服など他の固体表面へ附着する性質は、実際面の立場からは農作業の阻害要因として認められ、土壌物理学や土質工学の分野では、土壌粒子間のぎょう集性や剪断抵抗性などととも、土壌の変形や流動に対する抵抗性を意味するコンシステンシー（結持性）の一要因として認められてきた。

しかしながら土壌の附着性に関しては、これまで若干の研究が報告されているだけで附着の機構についてはもちろん測定法についても検討を要する点が多く、実際面においても附着軽減の十分な対策が確立されていないようである。このことは藍が耕うんのさいの犁体附着の問題に関連した報告においても指摘しているところである¹⁾。

筆者らは土壌の附着性の測定法と機構について研究を続けてきたので、それらを要約して以下に報告する。なお土壌の附着性に関する研究は一般にあまり知られていないようであり、研究の歴史的な発展の過程に非常に重要な問題があるので紹介し参考にとする。

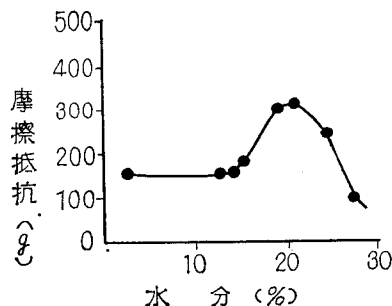
2. 研究の歴史

(1) **Atterberg** の研究²⁾ 土壌の附着性に関する研究の端緒は Atterberg らによって開かれたようで、附着性を初めてコンシステンシーに関係する重要な性質としてとらえた。すなわち湿った土壌表面にニッケル製のヘラをずらしたとき、ヘラに土壌が附着しなくなる限界の水分を“Klebegrenz”（sticky point：粘着点と同意語）と呼び、このときの水分が土壌の流動性を示し始める水分（液性限界水分）にほぼ一致することを見出した。

(2) **Hardy** らの研究³⁾ Hardy さんも粘着点について研究を行ない、粘着点の水分と粘土含量との間に密接な関係を認め、粘着点の水分は粘土粒子の周囲に厚い水膜が形成され、粒子間の小孔隙の多くが飽和されたときの水分を表わすことを推定した。このように Atterberg や Hardy らの粘着点の研究によって、附着性が水膜と関係

することが示唆された。

(3) **Haines** や **Nicols** らの研究⁶⁾¹⁰⁾ 彼らは土壌の附着性を初めて耕うんのさいの金属と土壌間の摩さつ抵抗の要因としてとらえた。すなわち Haines らは土壌と金属間の摩擦抵抗を、水分のことなる場合について測定した結果、図—1 に図示したように摩擦抵抗は少水分の範囲ではほとんど一定であるが、ある水分に達すると水分の増加にともない急増しついに最高に達し、水分がさらに増加すると再び減少しはじめることを見出し、この現象についてつぎのように説明した。a. 少水分段階で摩擦抵抗が一定であることについて；この水分範囲では土壌水分はおもに土壌粒子の周囲に水膜として存在し、粒子間隙の多くはごく微細な隙を除いて不飽和の状態にあり、金属板と土壌粒子間に形成される水膜は非常に少なく、したがって金属板と粒子間には水膜の表面張力にもとづく応力の発生がなく、金属板に作用する応力は一定の外力だけであるために摩擦抵抗にも変化がないものと推定した。b. ある水分範囲で摩擦抵抗が水分にともない増加したことについて；土壌水分が増加し、小さな粒子間隙から順次飽和されると、金属と土壌粒子間にも水膜が形成され始めそれにともない両者間に水膜の表面張力にもとづく応力すなわち附着力が発生し、これが荷重として作用するために摩擦抵抗が増大するものと推定した。c. 多水分段階で摩擦抵抗が水分にともない減少したことについて；この段階では粒子間隙の多くは飽和するために、金属と土壌間の水膜は急速に肥厚し、これが両者の間で潤かつ剤の役割を果す結果、摩擦抵抗が減少しはじめるものと推



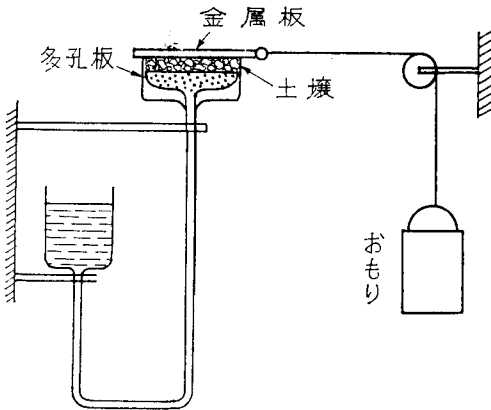
図—1 土壌／金属間の摩擦抵抗と水分の関係 (Haineら)

* 農業技術研究所化学部

定した。

このように、土壌の付着力いかにえれば土壌と附着板間のけん引力は、主として水の表面張力に基づく毛管力によって発生し、これが土壌および附着板に対して、外力（機械的荷重など）とは荷重の性質はことなるがやはり一種の垂直荷重として作用するために、摩擦抵抗が増大することは、 つぎにのべる Payne らの研究によって支持された。

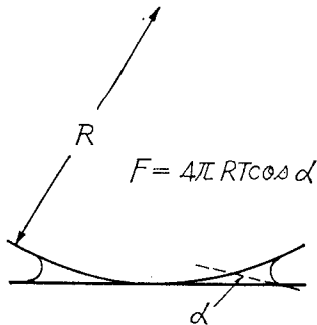
(4) Payne らの研究⁽⁴⁾ Payne らはこのことを、図一2のような装置によって附着板（金属）に外力（垂直荷重）を加えた場合と、相当荷重の水分張力（毛管圧）



図一2 土壌／金属間の摩擦抵抗の測定装置 (Payneら)

を作用させた場合とのそれぞれの摩擦抵抗の計測値が、低張力の範囲（飽和近傍）ではほぼ一致することから裏づけした。なお Payne らは摩擦抵抗 (S') と外力（垂直荷重, σ ）との間には、剪断抵抗 (S) と外力（垂直荷重, σ ）とに関するクーロンの公式と類似の、後者 (σ) を変数とする前者 (S') の一次式が成立することを認め、その定数 (C_a) を付着力として取扱っているが、この点については理論的に論議の余地があり、筆者は後記のように別の見解に立って考えている。

(5) McFarlane らの研究⁽⁵⁾ McFarlane らは、



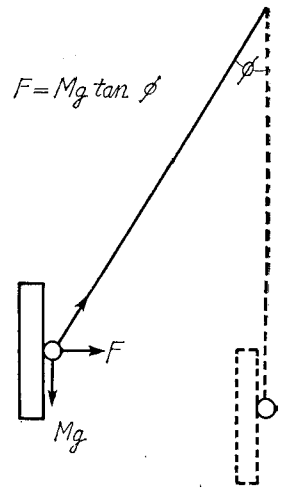
図一3 水膜の毛管力 (Mc Farlanesら)

小ガラス球（1個）が薄い水膜の毛管力によって附着板へ附着する強さ（付着力, F ）を、球の半径 (R) 水膜の表面張力 (T) および附着板の潑水度 (α) の関数として次式のような簡単な理論式（計算式）で表わした（図一3）。

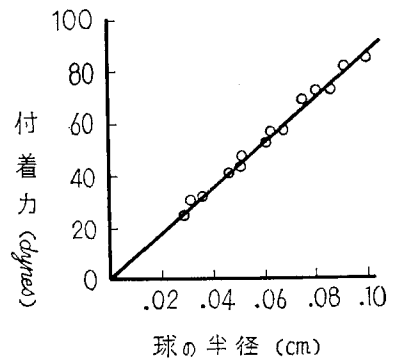
$$F = 4\pi RT \cos \alpha \dots (1)$$

（ただし π : 円周率）

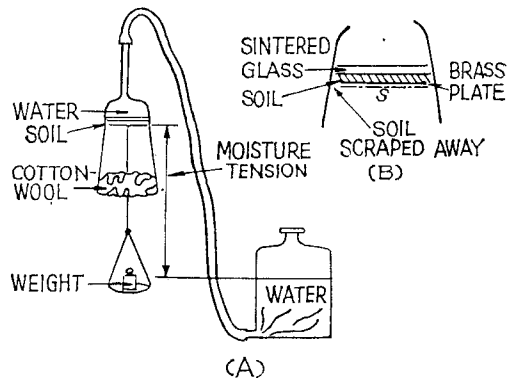
この計算式については途中の算出の過程が示されていないので詳細は明らかでないが、



図一4 振子方式による付着力の測定法 (Mc Farlaneら)



図一5 小ガラス球の付着力と粒径の関係 (Mc Farlaneら)



図一6 引きはなし方式による測定装置 (Fountaine)

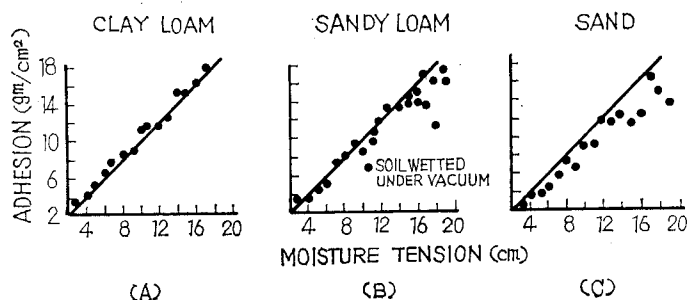


図-7 付着力と水分張力との関係 (Fountaine)

筆者らが導いた理論式⁸⁾から推定して、水膜が薄くかつ付着板が強い親水性 ($\alpha \neq 0$) の場合に限り成立するものと考えられる。McFarlane らは、図-4 のような振り子法によって種々の粒径 (R) のときの付着力 (F) を計測した結果、図-5 に図示したとおり実測値と理論値 (計算値) との間によい一致を認めた。

(6) Fountaine の研究⁵⁾ Fountaine は図-6 のような引きはなし方式による、土壌の付着力の測定法を考案し、付着力と水分張力や付着板の撥水性との関係など付着機構について実験による検討を試みた。その結果付着力と水分張力 (毛管圧) との関係については図-7 に図示したように、低水分張力の範囲において付着力はほぼ水分張力に一致することを認めた。この実験結果は McFarlane らの研究結果とともに、水の表面張力に基づく毛管力が付着力のおもな発生原因であることを強く支持することは明らかである。

(7) 松尾らの研究⁹⁾ 松尾らは Fountaine とはことなるがやはり引きはなし方式の測定装置を考案し、これによって土壌の付着力が粘土およびシルト含量と密接な関係があることを明らかにし、その関係を毛管力に基づいて説明した。

3. 土壌の付着力の測定法および機構に関する検討結果

従来の付着性に関する研究の経過は以上のとおりであ

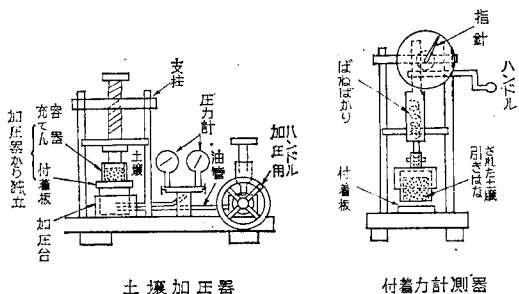


図-8 引きはなし方式による付着力の測定法

り、測定法については付着力を摩擦抵抗の垂直荷重外力に対する関係から間接的に算出する方法 (摩擦方式) と、土壌が付着板の法線方向へ引きはなされる際の抵抗力として直接計測する方法 (引きはなし方式) との二つの方式が開発され、付着力の定量的測定が可能となった。一方付着の機構については、付着力と水分 (張力) および粒径組成とくにシルト以下の含量などと

の関係について若干の実験による検討が試みられた結果、付着力の発生原因がおもに水の表面張力に基づく毛管力に帰着することがほぼ明らかになった。

しかしながら従来の研究では、測定法に関しても測定装置や測定操作法 (測定条件) などについて、一方機構に関しても付着力と付着板の撥水性および孔隙分布 (とくに小間隙量) などとの関係について、いずれも詳細な検討が行なわれていないことから、これらについて検討した結果を以下に要約して報告する。

1. 測定法に関する検討²⁾

摩擦方式と引きはなし方式とがあるが、土壌間の付着力の比較や測定値と理論値との比較などを目的として、絶対値が直接計測される後者の方式についてまず検討することとし、なかでも松尾らの方法は Fountaine らの方法に比して現地において農機具などへ土壌が付

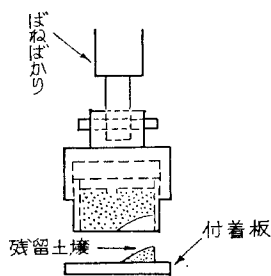


図-9 引きはなし時の土壌の残留

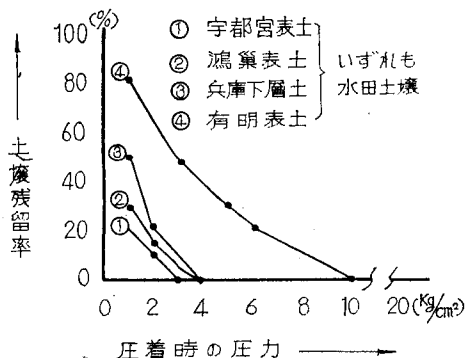
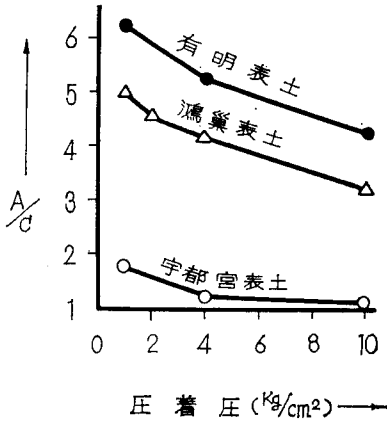


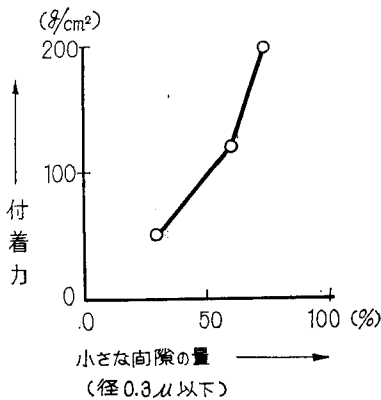
図-10 圧着時の圧力 (圧着圧) と土壌残留率との関係

着する条件に近くまた付着板の交換や、土壌を付着板へ圧着させるさいの圧着強度(圧)の調整が容易なことなどからこれを採ることとし、その装置について若干の改良を施すとともに測定操作法についても検討した。

(1) 測定装置(図一8) 改良後の装置の概要は図一8のとおりであり、付着板および充てん容器、土壌加圧器および引



図一11 圧着圧と付着力(A)の凝集力(C)に対する比(A/C)との関係



図一12 付着力と小間隙量との関係

る。

(2) 測定操作法 測定操作は目的に応じてことなることも考えられるが、筆者らは土壌間の付着力の比較などを目的とし、種々の土壌の付着力を共通操作によって測定できる一つの操作法として、飽和土壌からの一定圧着圧平衡水分での測定を行なうための操作法について検討したのでそのおもな点について述べる。

① 圧着圧と引きはなし時における土壌の残留(図一9)との関係 代表的な土壌についてこの関係を検討した結果は図一10に図示したとおり、引きはなしの際の付

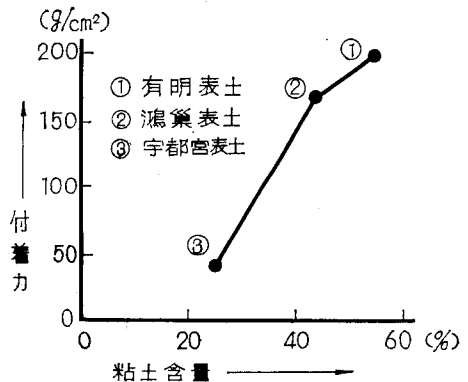
着板への土壌の残留は、いずれの土壌についても付着板への土壌の圧着が強い圧着圧(強度)で行なわれた場合ほど減少し圧着圧 4 kg/cm² 以上の場合には非常に重粘質な有明表土を除く他の土壌ではほとんど認められなくなったが、有明表土では圧着圧 10 kg/cm² 以上の場合にはじめて認められなくなった。このように、圧着圧は 4 kg/cm² 以上とすれば多くの土壌について付着力の正確な測定が可能であることから、土壌間の付着力の比較などのためには圧着圧は 4 kg/cm² 以上とすればよいことが明らかとなった。

② 付着力(A)のぎょう集力(C)に対する比(A/C)と圧着圧の関係 圧着圧の増加にともない土壌の残留割合が低下する現象は、強く圧着した場合ほど粒子と付着板間の毛管力による付着力(A)に対し、粒子間のそれによるぎょう集力(C)が増大する(A/Cが減少)ためと推定されるが、実験の結果も図一11に図示したようにこの推定に一致した。

2. 付着機構に関する検討

(1) 付着力と小間隙量との関係 付着力が毛管力によって発生するとすれば、付着力と小間隙量との間には密接な関係が推定され、検討した結果は図一12に図示したとおりであり、小間隙が多い土壌では付着力も大きいことが認められた。これは小間隙の多い土壌では一般に毛管力も大きいことを示唆するものと考えられる。

(2) 付着力と粒径組成(粘土含量)との関係 この関係についてはこれまで松尾らによって検討され両者の間に密接な関係のあることが報告されているが、筆者らも測定条件を変えたことからこの関係について検討した結果、図一13に図示したようにやはり両者の間に密接な関係が認められた。この現象は筆者らの解析した均一球粒子集合体モデルについての付着理論³⁾によればつぎのように説明される。すなわち粒径Rの均一粒子集合体と



図一13 付着力と粘土含量との関係

付着板間の毛管力による付着力 (F) の強さは、

$$F = k/R \quad (2)$$

(ただし k は水の表面張力, 土壌の水分 (張力) および付着板の水をはじく強さに関係する係数)

と表わされ、粒径以外の水分、付着板の撥水性などの条件がほぼ同じ場合には毛管力による付着力の強さは粒径に反比例することになる。したがって粘土粒子 (2μ 以下) は砂粒子 (200μ 以上) に比して、粒径が $1/100$ 以下であるので前者の付着力は後者のそれに比して 100 倍以上も強いことになり、一般に粘土など微細粒質部分の多い土壌の付着力が大きいことは明らかと推論され、実験の結果を説明できた。

3. 付着力と付着板の撥水性との関係

土壌の付着力が付着板表面の撥水性にえいきょうされることは、周知のように土壌がテフロンやパラフィンなど撥水性の強い (親水性の弱い) 器物よりも、ガラスや金属など撥水性の弱い (親水性の強い) 器物に付着しやすいことから推測されるが、両者の詳細な関係については従来説明されていないのでこの関係について検討した。検討の結果は図-14 に図示したとおり、付着力と撥

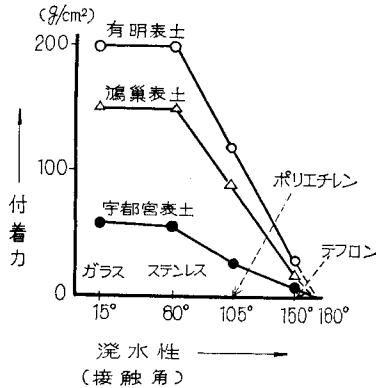


図-14 付着力と撥水性との関係

水性との関係に特徴ある傾向が認められた。すなわちいずれの土壌についても親水性器材 (接触角 90° 以下) のガラス板やステンレス板に対する付着力にはほとんど差異が認められず、そ水性器材 (接触角 90° より大) のポリエチレン板やテフロン板に対する付着力に差異が認められた。このように付着力への付着板の撥水性のえいきょうが、接触角 90° 以下の親水性の範囲では非常に小さく、接触角が 90° より大きいそ水性の範囲では接触角 (撥水性) の増加にともない顕著となる現象の理論的説明はかなり困難であるが、筆者らはこの現象を均一球粒子集合体モデルについての付着理論³⁾ のなかで、毛管力が土壌内 (粒子間) 間隙と付着板上の間隙とのそれぞれ

の間隙の形に支配されることに立脚して説明できることを明らかにした。

4. 今後の検討課題

1. 測定法に関して

(1) 付着試料の水分張力の調整 ここにのべた測定法は土壌間の付着力 (絶対値) の比較をおもな目的として検討されたものであり、付着力と水分張力との関係など付着機構の微妙な関係を解明することを目的とする場合には、ポーラスプレートなどを通じて付着試料 (計測試料) の水分張力を厳密に調整する必要がある。

(2) 摩擦方式による測定法について 土壌の付着力の測定法として引きはなし方式と並んで、この方式の重要なことは藍らも指摘しているところであり¹⁾、今後十分に検討する必要がある。

なおはじめにふれたように、Payne らをはじめ一般に摩擦方式による測定では、付着力は垂直荷重 (δ) を変数とする摩擦抵抗 (S') の一次式における定数 (C_α) いいかえれば無荷重 ($\delta = 0$) のときの摩擦抵抗 (S') として取扱われているが、この点についての筆者の見解は以下のものであり、今後議論の必要がある。すなわち S' , δ および C_α の関係は、剪断抵抗 (S), 垂直荷重 (δ) およびぎょう集力 (C) に関するクーロンの式

$$S = C + \delta \tan \delta \quad (3)$$

(ただし δ は内部摩擦角)

に類似する次式

$$S' = C_\alpha + \delta' \tan \delta' \quad (4)$$

(ただし δ' は土壌と金属間の摩擦角)

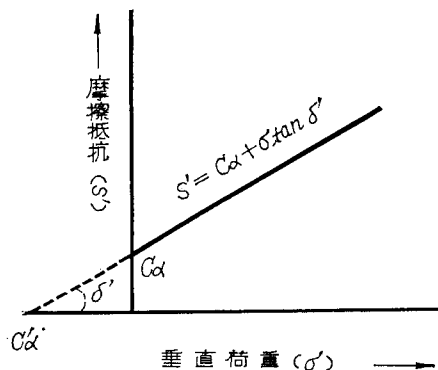


図-15 摩擦抵抗と垂直荷重との関係

として表わされている (図-15)。しかしながら筆者はさきに横井がぎょう集力は3式のように無荷重のときの剪断抵抗として表わすよりも、剪断抵抗を0にするに必

要な負の荷重いいかえれば張力として表わす方が適当であるという見解を提示していること¹²⁾、および付着力の主要な発生因子が付着板の法線方向に作用する毛管力であることなどを考慮すれば、付着力は無荷重 ($\sigma=0$) のときの摩擦抵抗ではなく、摩擦抵抗を 0 にするのに必要な負の荷重いいかえれば張力 ($C_{\alpha}'=C_{\alpha}/\tan \delta'$) として表わされるのが適当ではないかと考える。いいかえれば 4 式は次式

$$S' = C_{\alpha}' \tan \delta' + \sigma \tan \delta'$$

または

$$S' = (C_{\alpha}' + \sigma) \tan \delta' \quad (5)$$

のように表わされる方が妥当ではなからうか。

2. 付着機構に関して

(1) 付着力と水分および水分張力との関係 これらの関係は付着機構のなかでももっとも重要な関係であり今後詳細な検討が必要であろう。

(2) 付着力とぎょう集力との関係 この関係は現地における付着性の問題を考える上に非常に重要な関係で今後の重要な検討課題の一つとなろう。

(3) 付着機構における粘性の役割 静的条件下では毛管力が付着機構の支配要因となるが、現地など動的条件下では毛管力の他に粘性にもとづく因子も要因となることが推定され、レオロジカルな研究が今後必要となろう。

5. 要 約

付着性に関するこれまでの研究の歴史と筆者らの測定法および付着機構に関する研究の概要を紹介し、土壌の付着力の主要な発生因子が水の表面張力に基づく毛管力であることを明らかにするとともに、このことを基礎として測定法および付着機構についての今後の検討事項についても述べた。

文 献

- 1) 嵐 房和：火山灰土壌の転うんの諸問題，土壌の物理性第18号，p.27 (1968)
- 2) 秋山 豊・横井 肇：土壌の付着性に関する研究（第1報）—付着力測定法について，土肥誌，39 (No. 11)，491 (1968)
- 3) 秋山 豊・横井 肇：同上（第2報）—付着機構の理論的解析，土肥誌投稿予定
- 4) ATTERBERG, A.: DIE PLASTIZITÄT DER TONE, INTERNATL. MITT. BODENK., 1, 10(1911)
- 5) FOUNTAINE, E. R.: INVESTIGATIONS INTO THE MECHANISM OF SOIL ADHESION, J. SOIL SCI., 5, 251 (1954)
- 6) HAINES, W. B.: STUDIES IN THE PHYSICAL PROPERTIES OF SOILS, J. AGR. SCI., 15, 178 (1925)
- 7) HARDY, F.: AN INDEX OF SOIL TEXTURE, J. AGR. SCI., 18, 252 (1928)
- 8) MC FARLANE, J. S., AND TABOR, D.: ADHESION OF SOILS AND THE EFFECT OF SURFACE FILMS, PROC. ROY. SOC. A, 202, 224 (1950)
- 9) 松尾憲一：粒徑組成と土壌の物理性に関する研究，農技研報B14, 323 (1964)
- 10) NICOLS, M. L.: METHODS OF RESEARCH IN SOIL DYNAMICS, ALA. AGR. EXPT. STA. BULL. 229, 28 (1929)
- 11) PAYNE, P. C. J., and FOUNTAINE, E. R.: THE MECHANISM OF SCOURING FOR CULTIVATION IMPLEMENTS, NATL. INST. AGR. ENGIN. TECH. MEMO., 116, 11 (1954)
- 12) YOKOI, H.: RELATIONSHIP BETWEEN SOIL COHESION AND SHEAR STRENGTH, SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION, 14, 9 (196-)