

重粘性土壌に対する砂客土の易耕性改善効果

Effect of Sand Dressing on the Physical Properties and Tillage of Heavy Clayey Soil.

岩間 秀 矩* 石井 和 夫**

はじめに

北海道北部に分布する疑似グライ土によって代表される重粘性土壌の易耕性の問題点として、i) 排水の不良により過湿状態であることが多く、農作業を困難にし作業機の稼働日数が低下すること、ii) 表土(A層)が浅いため堅密でかつ可塑性の高い下層土が耕耘の障害となり、あるいはこれが作土層に混入して、その物理性を悪化させることなどがあげられている^{6,7,13,14})。このような易耕性の悪い重粘性土壌を改良するためには、過剰水の排水を行なうことが基本的条件となることが指摘され、暗渠排水、心土破碎などの排水促進を主体とした土地改良が顕著な効果をあげている^{14,16})。また、砂客土は重粘な表土の物理性の改良法として古くから提唱されてきたが、昭和40年頃から畑地の総合土地改良事業として前記土地改良工法と組み合わせて大規模に実施されるようになり、改めて土地改良の一環として、その効果を再検討する必要がでてきた。

すでに砂客土による重粘性土壌の改良効果について多くの研究がなされており、千葉¹⁹)は作物の増収効果に加えて耕作労力の顕著な軽減を認め、森¹³)、深井⁴)らは砂客土の効果として気相の増大、保水性の低下、地温の上昇、硝化能の増大および可塑性、粘着性の低下を明らかにした。佐久間¹⁴)は土壌の水分系および充填挙動に及ぼす砂混合の影響を検討し、最適客土量の存在と砂客土により増加した粗孔隙の安定性の低いことを指摘した。ま

た、土木の分野においても砂混合土の物理工学的性について詳しい検討がされてきた^{10,12})。しかしながら、これまでのところ耕耘作業に対する砂客土の効果について、現地における土壌の物理性にもとづいた検討は少ない。そこで本報では砂客土の易耕性に関する改善効果を解明するために、トラクター踏圧による土壌圧縮および碎土について圃場における調査を行ない、さらに室内実験によりその解析を試みたのでその結果を報告する。なお、研究の一部は北海道庁耕地課の委託費によって行なわれた。

I 試験地および供試土壌

供試圃場は北海道における典型的な重粘性土壌(疑似グライ土⁶)とされている重粘地研究室圃場(紋別市小向)内の未墾地を昭和40年に開墾して造成した総合土地改良試験圃場である。易耕性に関する調査は45年度より行ない、砂客土量0, 30, 45 m³/10 aの3区を主に供試した。供試区は砂客土の他に暗渠排水(B=18 m, H=0.75 m)、心土破碎(B=0.8 m, H=0.6 m)の土地改良が施工されている。また、圃場の来歴は、いずれも昭和41年より、馬鈴薯、甜菜等の畑作物の輪作を行なってきた。

供試試験区の土壌の理化学性は表-1に示すとおりで、作土は全区とも深さ30 cmの深耕をしているため下層土が多く混入しており、粘土含量が多く、腐植が少ない。なお、砂客土には粗砂を95%以上含む海砂を使用した。

表-1 供試圃場の土壌の粒径組成およびアッタベルグ限界

供 試 圃 場	粒 径 組 成					腐 植	真 比 重	アッタベルグ 限 界		
	粗 砂	細 砂	シルト	粘 土	LL			PL	IP	
砂客土 0 m ³ 区	1.9	16.7	40.7	41.8	2.69	2,602	52.1	28.4	23.7	
砂客土 30 m ³ 区	9.9	13.7	35.5	39.2	2.17	2,617	44.5	23.0	21.5	
砂客土 45 m ³ 区	17.3	14.9	35.5	31.6	1.88	2,628	33.6	21.5	12.1	

* 北海道農試 農芸化学部

** 現東北農試 環境部

II 砂客土が土壤水分に及ぼす影響

前述したように、土壤水分は重粘性土壤の易耕性を基本的に規制しており、ここでは砂客土の影響について作土の孔隙分布および圃場における水分変動を調査した結果を示す。孔隙分布の測定は吸引法により行ない、また、圃場の水分変動は深さ 10 cm に埋設したテンションメーターにより測定した。

図-1に作土の上層(0~20 cm)および下層(20~30 cm)の孔隙分布曲線を示したが、砂客土による粗孔隙の増加が認められ、とくに作土下層においてその差が明らかであった。これは供試圃場の耕耘の来歴が造成当初の2年間は深耕を繰り返し行なったが、調査前の2年間は作土上層(0~20 cm)のみを耕耘してきたことから、作土下層(20~30 cm)は鋤床として圧縮作用を受けてきたと考えられ、そこにおける粗孔隙量の増加は砂客土による土壤の圧縮性の軽減効果を意味すると考えられた。

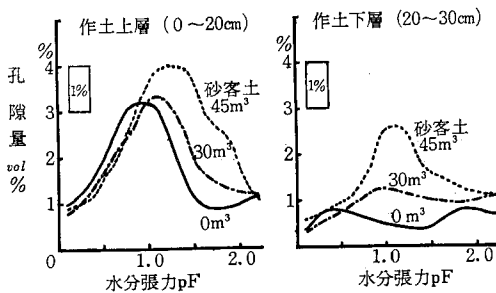


図-1 孔隙分布

図-2に早春融雪後の土壤水分の乾燥過程を示した。その結果をみると、砂客土単独施工区は無改良区と同様に作土の排水が不良であったが、暗渠および心破等の排水施工と砂客土を組み合わせた場合には、砂客土量の増加に伴い作土の排水および乾燥が顕著に促進されること

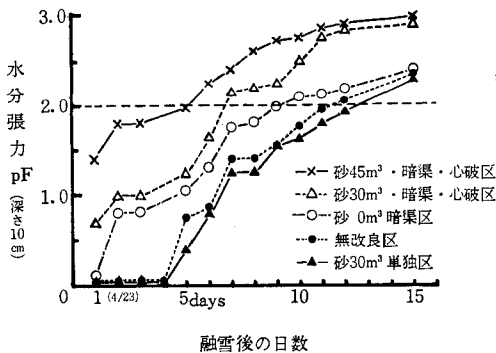


図-2 融雪後の乾燥過程

が認められた。

以上の結果から、砂客土が重粘性土壤の土壤水分に及ぼす影響は粗孔隙を増大させ、保水性を低下させることであり、そのことにより易耕性の改善に寄与していると考えられた。また、粗孔隙の増大は砂客土による圧縮性の軽減と、土中における客入砂の不均一な分布⁶⁾に起因すると考えられた。

III 砂客土が土壤圧縮に及ぼす影響

1) 試験方法

砂客土量 0, 30, 45 m³/10 a の 3 試験区を供試し、碎土整地し、数回の降雨があった後に下記のようなトラクターの走行試験を行なった。

供試トラクター: 42馬力ホイール型(ナフィールド製)、重量 2,220 kg, 自走。

走行回数および速度: 1~10回, 1 m/sec.

調査項目: 走行前後における表土の土壤硬度、密度、三相分布、土壤水分。

2) 結果および考察

踏圧に伴う表土の貫入抵抗の変化を図-3に示した。貫入抵抗はSR II型土壤抵抗器により小型コーンを用いて5ヵ所測定を行ない、深さ 0, 2, 5 cm における値を平均に示した。その結果をみると、踏圧回数の増加に伴い貫入抵抗が増大する曲線群と、停滞もしくは低下する曲線群に各区いずれも2分され、その境界となる土壤水分はおおよそ pF 2.0 であることが認められた。これは pF 2.0 より多水分側ではトラクターの走行により土壤が軟化し¹⁷⁾、土壤のこね返しや深いわだちの形成など、物理性の悪化や走行性の低下が生じることを意味しており、重粘な畑土壤においてトラクターの走行限界の指標として pF 2.0 が妥当であることを示すと考えた。

次に、踏圧に伴う土壤密度の変化と土壤水分(踏圧前、作土 0~10 cm)の関係を図-4に示した。砂を客土していることから土壤密度の大小による圧縮性の直接的な比較は出来ないが $\gamma d-\omega$ 曲線の型をみると、とくに1回踏圧土壤では圧縮最適水分(各区いずれもほぼ pF 2.0 付近であった。)におけるピークが砂客土量の増加に伴いなだらかとなり、また、多水分側における密度低下の傾向が不明確になるなど、砂客土による土壤の圧縮性の変化が認められた。そこで、さらにこの点を明らかにするために多水分域(pF 2.0 \geq)における踏圧に伴う土壤三相(深さ 0~5 cm)の変化を検討してみると、図-5に示すとおり砂無客土区では踏圧により W-V 相関がなくなり、かつ V_L-V_S が負相関になるなど、気相が著しく減少し容易に二相系¹⁸⁾となることが示されたが、砂客

土によりその傾向が軽減されることが認められた。また、W-V 相関における回帰係数が砂客土により減少する傾向が認められ、保水性が低下することが示された。

以上、砂客土が重粘性土壌の圧縮性を軽減する効果が認められたが、これは、三相構造の改善と保水性の低下による圃場の水分状態の改善に加えて、後述の可塑性の低下等力学的性の改善もその要因になるものと考えられ

た。

IV 砂客土が碎土に及ぼす影響

1) 試験方法

圃場試験：供試試験区は前節と同じく砂客土量 0, 30, 45 m³/10 a の 3 区とし、土壌水分および土壌密度の均一性を考慮して、第 2 節において述べた作土下層 (20

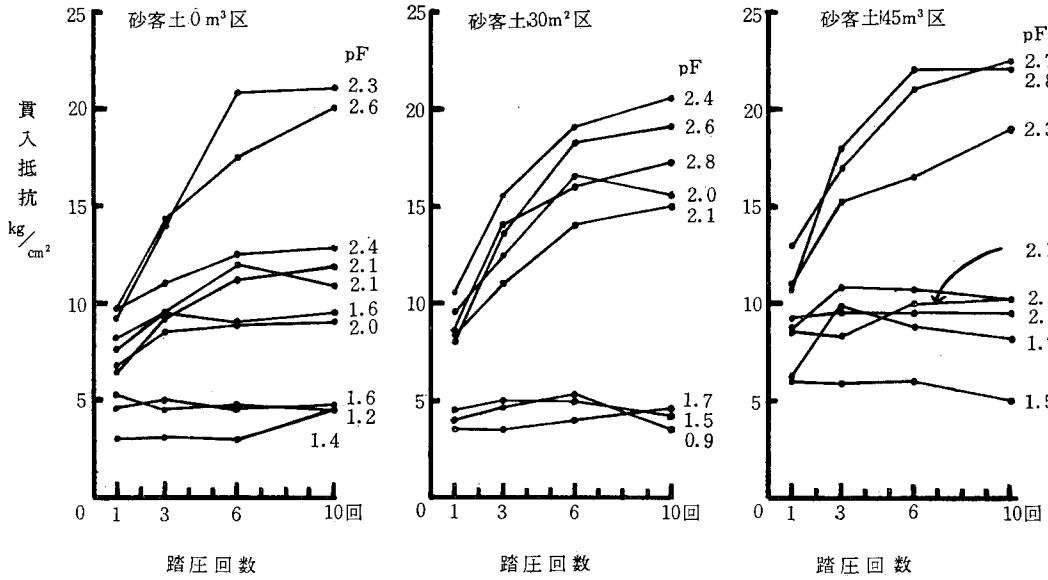


図-3 踏圧による土壌の貫入抵抗 (0~5 cm) の変化

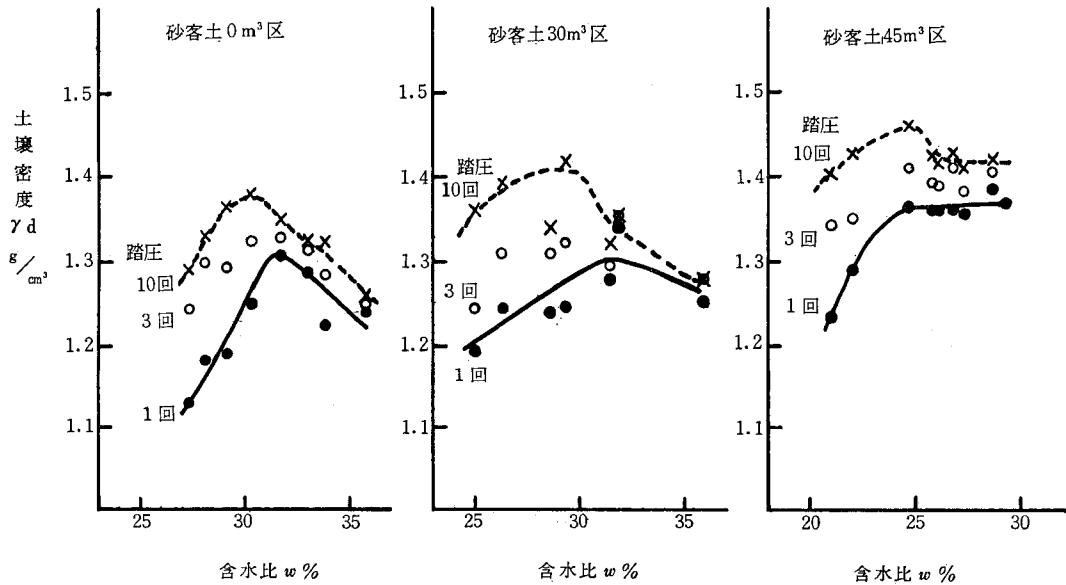
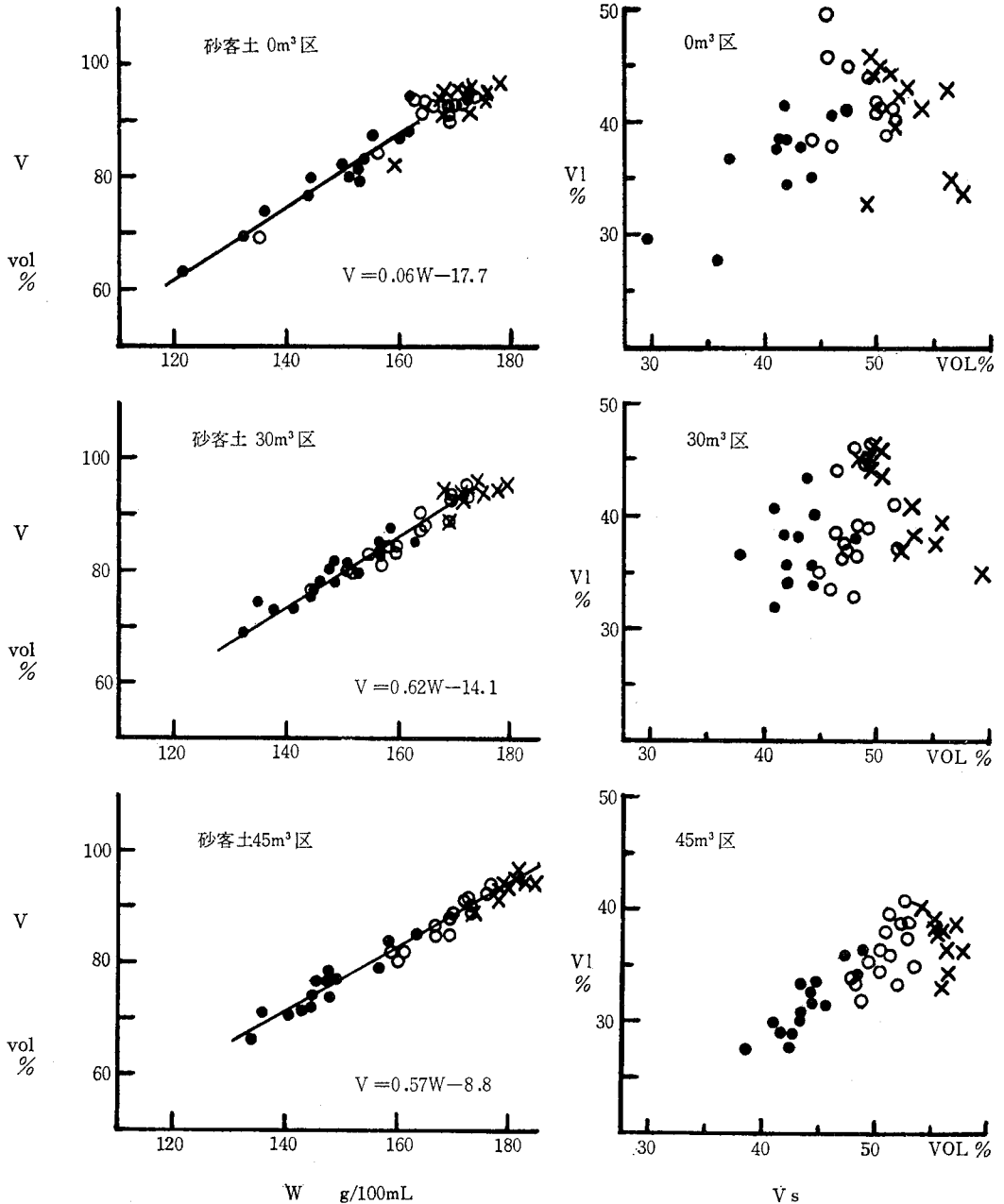


図-4 トラクターの車輪踏圧による土壌密度の増大と土壌水分

全重量(W)－実容積(V)の相関

固相率(Vs)－水分率(VL)の相関



●踏圧前, ○1回走行跡, ×6~10回走行跡

図-5 踏圧に伴う土壌三相の変化

～30 cm) を碎土の対象土層とした。碎土試験の方法は、まず深さ 30 cm の反転耕により作土下層を表層に露出させ、直ちにロータリー耕 1 回掛を行ない、土塊分布および土壌水分を調査した。

不攪乱土の一軸圧縮試験：砂客土が土壌の強度および流動性に及ぼす影響を把握し、碎土試験結果との対比を行なうために、供試区で作土下層より不攪乱土壌を採取し一軸圧縮試験を行なった。これは本試験における深耕

作土のように比較的粗い土塊組成⁷⁾を持つ土壌の不攪乱状態での力学性の測定に一軸圧縮試験^{3,20)}が適当であると考えたことによった。不攪乱土壌の採取は100 cc 採土円筒を用いて行ない、押し出した土柱をデシケーターに入れ、乾燥剤を用いしないで徐々に乾燥させて水分を調整し、土質試験法³⁾に準じて一軸圧縮試験を行なった。供試土柱の高さと径の比はほぼ 1:1 (5 cm) とした。

2) 結果および考察

砕土試験結果を図-6に示した。この結果から、砂客土により砕土適水分範囲が拡大し、かつ、砕土率も良好となることが認められた。ここで砕土適水分範囲をそれぞれの土壌について最も良く砕土が行われる水分範囲(1 cm 大土塊量が最小値より数%増加する範囲内)として図-7に不攪乱土壌の一軸圧縮試験結果との対比を試みた。図-7 上段は一軸圧縮強度 qu と含水比 w 、下段は

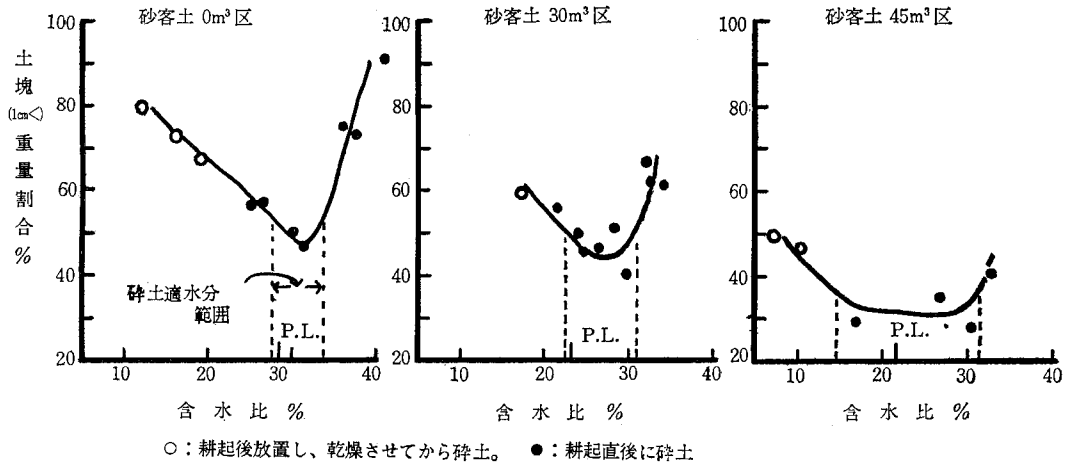


図-6 土壌水分と砕土率

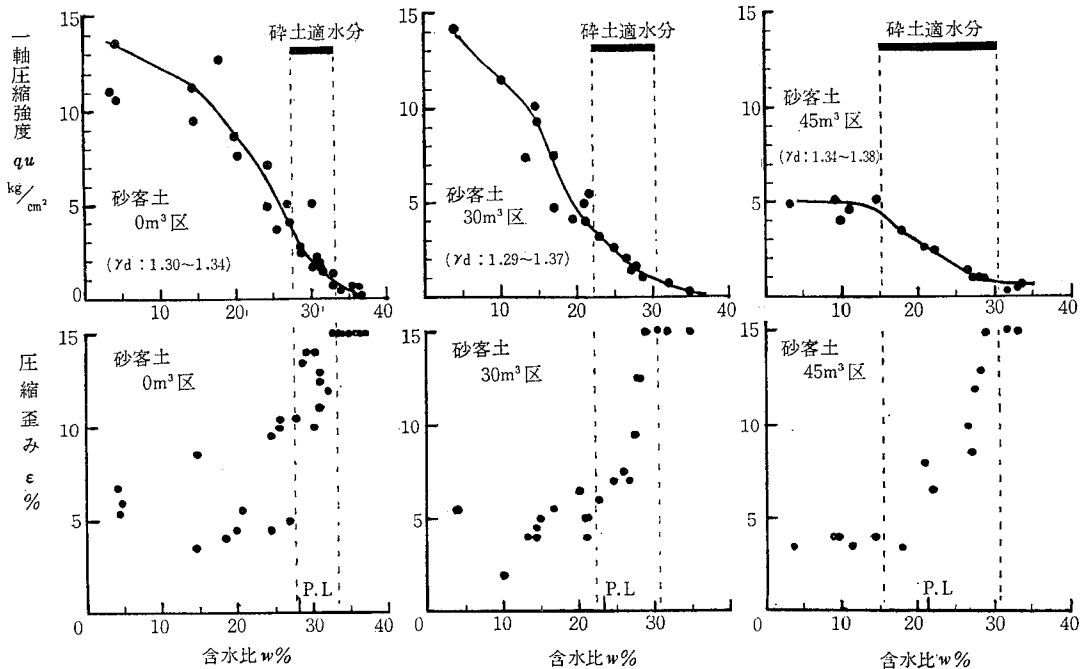


図-7 不攪乱土壌の強度および流動性と砕土適水分範囲

qu に対応する圧縮歪み ϵ (%) と含水比 w の関係をそれぞれ示した。一軸圧縮試験は圧縮歪み $\epsilon=15\%$ まで行ない、その間における圧縮応力の最大値を一軸圧縮強度 qu とした。この結果をみると、まず、砕土適水分の少水分側の限界は各区いずれも $qu=4\text{ kg/cm}^2$ となる水分点にはほぼ一致することが認められた。砕土適水分の少水分側限界について佐藤¹⁵⁾はデスク耕において凝集力(山中式切断強度) 1 kg/cm^2 に相当するとしているが、これは一軸圧縮強度に類似する内容を持つ圧碎強度⁵⁾ について圧碎強度 $\approx 5 \times$ 切断強度の関係が認められていることからして、本試験のロータリー耕における結果とほぼ一致すると考えられた。また、砕土適水分の多水分側の限界は一軸圧縮試験における塑性流動水分点²⁰⁾ すなわち $\epsilon=15\%$ に達しても応力にピークが現われなくなる水分点に近似していることが認められた。この不攪乱土壌の塑性流動水分点は塑性限界あるいは一定のコンシステンシー指数値に一致する傾向は認められないが、砂客土による可塑性の低下 (I_p の低下など) に伴いそのコンシステンシー指数は小さくなる傾向であった。

以上の結果は、一軸圧縮試験による土壌の強度と流動性の測定により、ロータリー耕とは土壌に対する力の作用性がかなり異なるにもかかわらず、ロータリー耕の難易の判定が可能であることを示しているが、耕耘速度が異なれば耕耘適水分も変化する²⁾ とされており、今後さらに、土壌の力学性の動的な測定による検討が必要と思われた。

また、上記の結果は3試験区において、砕土率がかなり異なるにもかかわらず砕土適水分範囲の制限要因が一致していることを示しているが、これは砕土適水分範囲がそれぞれの土壌においてロータリー耕が比較的抵抗なく、かつ、土壌のこね返しを生じることなく行われる水分範囲であり、その制限要因として、少水分側では土壌強度を、多水分側では流動性を考えることが適切であることを意味し、また、砕土率はこれら二つの制限因子の相対的な関係に関連していること、すなわち、砕土適水分範囲が狭い土壌は、流動性が大きい範囲内で強度が急増しており、砕土率が低下する傾向にあることを示した。しかし、砕土率(砕易性)については以上の他にも土壌の構造、耕耘の履歴等の複雑な要因が関与しているものと考えられた。

以上、重粘性土壌の砕土を規制する物理的要因とそれに及ぼす砂客土の改善効果について明らかにしてきたが、圃場における砂客土の砕土性改善効果には土性改善による力学性の改善に加えて、土壌水分状態の改善や圧縮性軽減効果などが複合してその要因となっているもの

と考えられた。

V 圧縮および砂混合による土壌の力学性の変化

前述してきたように、圃場における砂客土の易耕性改善効果には種々の要因が複合して現われているが、ここでは室内実験により重粘性土壌の圧縮と砂混合がその力学性に及ぼす影響を一軸圧縮試験により検討し、砂客土の易耕性改善効果をさらに明らかにしようとした。

1) 試験方法

供試土壌は砂無客土区作土でその理化学性は表-1に示した。砂混合土は風乾細土に粒径 $0.5\sim 1.0\text{ mm}$ の海砂を 0, 5, 10, 20, 30, 50, 70 重量% となるようにそれぞれ混合して調製した。一軸圧縮試験に供試した土柱の成形は内径 30 mm 、高さ 75 mm の硬質塩ビパイプに風乾土 $50\sim 60\text{ g}$ を軽く詰め、砂柱上に毛管吸水後、塩ビパイプに摺り合せとなる円柱を差し込み単純圧縮試験器を用いて所定の圧力にて圧縮速度が $0.1\%/\text{min}$ 以下となるまで $10\sim 15$ 分間加圧した。その後、土柱を押し出し高さ \times 径の比が $1:1$ となるように成形した。土柱の水分調整および一軸圧縮試験の方法は前節と同様とした。土壌圧縮の力学性への影響については成形圧力を 1 から 10 kg/cm^2 まで段階的に変えて原土壌(砂 0%) について検討を行ない、砂混合土の力学性については成形圧力を全て 2 kg/cm^2 として検討した。

2) 結果および考察

i) 圧縮土の力学性: 成形圧力を異にする土柱の一軸圧縮強度と土壌水分の関係を図-8に示したが、成形圧力の増大により一軸圧縮強度は増大し、土壌水分の減少に伴いさらにその傾向が顕著となることが認められた。その結果、図中に示すように砕土適水分の少水分側限界が圧縮により多水分側に移動した。他方、成形圧力が塑性流動水分点に及ぼす影響は図-9に示されるように余り明確ではなかった。ただし、成形圧力が 5 kg/cm^2 以上の場合には圧縮により脱水され、飽和状態においても塑性流動水分に達しなかった。

以上の結果は、圧縮応力が比較的小さい範囲では土壌の圧縮は強度を増大させるが流動性には基本的な影響を与えないことを示しており、石井ら⁹⁾ が圃場におけるトラクターの多数回踏圧による土壌圧縮は圧縮応力 4 kg/cm^2 の静的な一軸圧縮に相当するとしていることから、通常の畑地において生じる土壌圧縮は圧力 4 kg/cm^2 以下の圧縮であると考えられ、その砕土に及ぼす影響は主として砕土適水分範囲の少水分側限界を縮小させることであると考えられた。

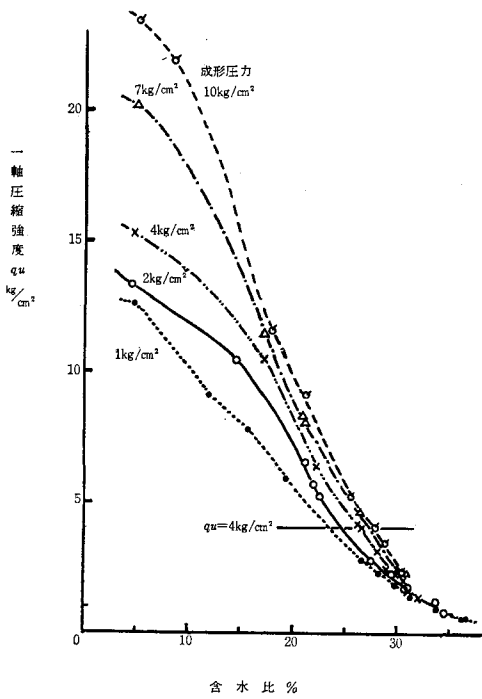


図-8 圧縮土の一軸圧縮強度

しいことが確認されたが、砂混合率 50%では 1.40、70%では 1.29 となり砂混合率が著しく多い場合には圧縮性の軽減は避けられなかった。こうした条件により成形した土柱について i) と同様の検討を行なった。

まず、一軸圧縮強度と土壌水分の関係を 図-10 にみる

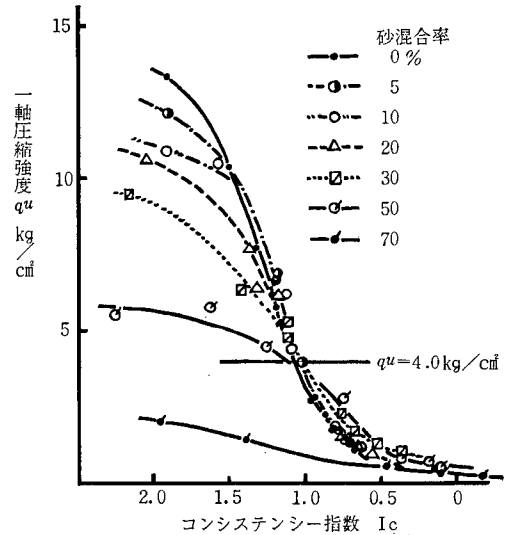


図-10 砂混合土の一軸圧縮強度

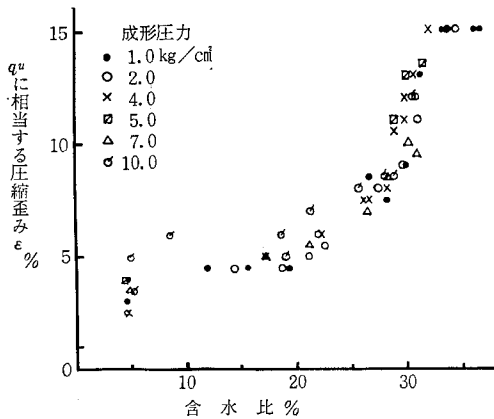


図-9 圧縮の流動性

ii) 砂混合土の力学性：砂混合による重粘性土壌の土性の変化と力学性との関係を明らかにするには、砂混合による圧縮性軽減効果を分離することが必要と考えられ一軸圧縮試験に供試する土柱の成形に際しては多水分状態にて充分に時間をかけて加圧した。なお、供試土柱の圧縮度の比較のために、砂混合土より砂の体積を差し引いて原土壌についての乾燥密度を計算してみると、砂混合率 0~30%では 1.43~1.45 とほぼ一致し圧縮度が等

と（ここで土壌水分は比較のためコンシステンシー指数により表示した。）、砂混合が土壌の強度に及ぼす影響はほぼ塑性限界を境として傾向が異なり、多水分側では強度を増大させ、少水分側では強度を減少させることが認められた。この結果は多水分側における圧縮に対する抵抗性の増大と少水分側における砕土性の改善など砂混合による易耕性改善効果を示しているが、こうした土壌の強度の傾向が土壌水分により異なる理由については、塑性限界付近を境として土壌の変形と強度の内容が異なることが考えられ、多水分側では粗大な砂粒子の土壌への混合は、外力による変形に伴う土粒子の移動に対する抵抗を増大させる結果強度を増大させ、少水分側では土壌の強度の主な要因が細粒質部分の凝集力⁵⁾であり、砂混合はその量的割合を低下させ、強度を減少させたと考えられた。しかし、実際の砂客土量に相当する砂混合率 0~20%の砂混合土の強度と水分の関係を見ると、少水分域において砂混合による強度の減少が顕著になるのは $I_c=1.3$ （ほぼ収縮限界に相当する）以上はかなり乾燥した水分域においてであり、実際に問題となる $qu=4 \text{ kg/cm}^2$ 付近の水分域においては砂混合の効果は小さく、砂混合による粘性土の土性の変化に基づく少水分域における砕土性の改善効果は、砂混合率が 20%以下の

場合には比較的小さいものと考えられた。したがって、前節の圃場における少水分域での砂客土の碎土性改善効果は、むしろ砂客土による圧縮性軽減効果等に起因することが推察された。

次に砂混合土の流動性について図-11にみると、砂混

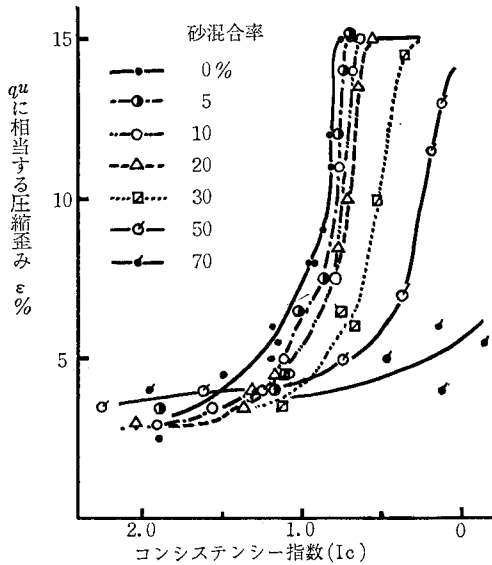


図-11 砂混合土の流動性

合率の増大に伴い塑性流動水分点のコンシステンシー指数は低下し、碎土適水分の多水分側限界はさらに多水分側に拡大される傾向が認められ、碎土に関連した土壌の力学性に及ぼす砂混合の影響は土壌の流動性の低下が最も基本的であると考えられた。

VI 要 約

重粘性土壌の易耕性に及ぼす砂客土の効果について圃場および室内実験により検討し、その結果、砂客土による重粘性土壌の物理性の基本的な変化と圃場における易耕性改善効果の関連について若干の知見を得た。また、畑土壌におけるトラクターの走行性および碎土に関する土壌の物理的要因についても理解を深めることが出来た。得られた結果の要約は次のとおりである。

1) 砂客土が土壌の三相構造に及ぼす影響は固相および気相(粗孔隙)の増大である。とくに、粗孔隙の増大は重粘性土壌の保水性を改善し、易耕性の改善効果の基本的要因となる。圃場における砂客土による粗孔隙の増大は、圧縮性の軽減効果および客入砂の土壌中での不均一な分布による効果に基づく。

2) 砂の混合が土壌の力学性に及ぼす影響は可塑性

(流動性)の低下と、PLより多水分側における圧縮強度の増大および少水分側における凝集力の減少が基本的である。

3) 砂客土による土壌の圧縮性軽減結果は多水分域における圧縮強度の増大および可塑性の低下に加えて、圃場においては保水性の低下による水分状態の改善がその要因となる。

4) 砂客土による重粘性土壌の碎土性改善効果は、多水分域における流動性の低下と少水分域における凝集力の減少に加えて、圃場においては圧縮性軽減効果および水分状態の改善がその大きな要因となる。

5) 重粘性の畑土壌におけるトラクターの走行限界水分の指標として pF2 が適当である。

6) 一軸圧縮試験による重粘性土壌の強度と流動性の測定は、現地における碎土作業の精度との対応が可能であり、とくに、不攪乱土壌の力学性の測定に有効である。

引用文献

- 1) Bayer, L. D.,: Soil Physics (3rd. ed.) (1956)
- 2) パーフテン, P. U. (寺沢四郎訳): 土肥誌, **35**, 220 (1964)
- 3) 土質工学会: 土質試験法, 336 (1969)
- 4) 深井強, 池盛重, 伊東美智男, 増島博, 昆忠男: 北農試彙報, **77**, 56 (1962)
- 5) 福士定雄: 土肥誌, **40**, 49 (1969)
- 6) 重粘地グループ: 北海道北部の土壌(北海道開発局)(1967)
- 7) 箱石正, 赤塚恵: 北農試彙報, **84**, 40 (1964)
- 8) 石井和夫, 岩間秀矩: 農業技術, **27**, 82 (1971)
- 9) 石井和夫, 徳永美治: 土肥誌, **39**, 463 (1968)
- 10) 倉田進, 藤下利男: 運技研報, **11**, 389 (1961)
- 11) 美園繁, 川尻美智子: 農技研報, **B 18**, 49 (1967)
- 12) 宮内定基: 研究の資料と記録, **17**, 56 (1969)
- 13) 森哲郎, 深井強: 北農試彙報, **74**, 30, (1959)
- 14) 佐久間敏雄: 土木試報, **55**, (1971)
- 15) 佐藤雄夫, 湯村義雄: 東近農試研報, **19**, 127 (1970)
- 16) 塩崎尚郎, 石井和夫, 池盛重: 農事試験調査資料(北海道農試), **129** (1971)
- 17) 須藤清次, 安富六郎: 農業土木研究別冊, **7**, 98 (1963)
- 18) 寺沢四郎: 農技研報, **B 22**, 85 (1971)
- 19) 千葉登: 北農, **17**, 169 (1951)
- 20) 山沢新吾: 東教大農紀, **11** (1964)