

黒泥土壤における弾丸暗きょの効果について*

内田文雄・川田 登

I 緒 言

弾丸暗きょは別に「モグラ暗きょ」とも呼ばれる^{5, 18)}。この技術的歴史は古く1929年古賀正己の考案試作機が最初で、当時は干拓地の除塩などが主な目的でありウインチなどで引く方法がとられた¹⁸⁾。その後はこの技術の改良が進み、水田の排水改良や重粘土地の土層改良、さらには機械化を前提とした土壤の地耐力の向上などへと発展している^{4, 7, 9, 13, 18)}。現在この施工にあたっては主として大型トラクターなどによって索引され、またきょ孔には疎水性の材料（もみがらなど）の送入やきょ孔の崩壊防止のための有材の弾丸暗きょ（ポリ管など）のようなものまで出現してきている^{4, 13, 18)}。

この施工技術やその効果に関する研究については多くの報告がみられるが、しかしこれらについては土壤条件や施工条件などによってはきょ孔の耐用性や作物生産性からの効果などに差がみられる。

筆者らがこの試験を行なった理由は、1967年栃木県小山市今里地区が「稲作総合改善集約指導地」として国の指定をうけ、圃場の整備および各種対策事業が実施されたが、その中で水田総面積64 ha のうさ18 ha にこの弾丸暗きょが施工された。これはこの土壤の特徴が、土性は粘質から強粘質で内部排水が不良で水稻は根系障害のおそれ多いため、その物理性の改善をはかるために実施された。この効果確認と施工後の肥培管理ならびに農業機械に対する地耐力などについて、1968年から1970年までの3カ年間

試験を実施したのでこの結果を報告する。

なおこの試験実施にあたっては種々有益な助言と指導をくださった当场土壤肥料部土山 豊部長と圃場を心よく提供し調査に便を計ってくれた青柳源一氏、ならびに本稿を校閲して下さった当场場長補佐坪田五郎博士の諸氏に心から感謝の意を表する。

II 試験方法

1. 試験地の位置と土壤条件

1) 位置：栃木県小山市今里 青柳源一氏所有圃場（圃場No.97）

2) 土地条件：地形は思川沖積地の平坦低地で、標高は約30mである。主な灌漑用水は大宮地区の湧水池を水源とする綾川用水で、1967年には圃場整備を行ない一筆の田区は30 a（30 m × 100 m）である。なお整備による土層の移動攪乱はほとんどなかった。

3) 試験地の土壤：この土壤は内山らによる分類では黒色低湿地土（黒泥土）・施肥改善¹⁾調査事業による分類では黒泥土壤粘土型に属し、表層50cmは黒褐色のLicで表土は厚いが通気・透水性は悪く、下層50cm下は黒泥層となる。この土壤の主な断面形態とその理化学性は第1表のとおりである。

水稻の生産阻害因子は土壤の内部排水の不良などが要因で、出穂期以降の根腐れ障害は著しく（出穂期での不良根20~30%）¹⁴⁾水稻の平均収量は42 kg/aである。なお大型機械による作業は沈下・スリップなどがしばしばみられ、特に

*この報告の一部は日本土壤肥料学会関東支部大会（1971. 4. 6）で発表した。

第1表 試験地の土壌

| 層 | 位 | 土色 | 土性 | 構造 | ち密度 | 粘着性 | 透水性 | 粘土(%) | 全炭素(%) | 全窒素(%) | 磷吸 |
|-----|-------------------|-----------------|------|-----|-----|-----|-----|-------|--------|--------|------|
| 第1層 | 0~16cm | 黒褐(10YR 2.5/3) | Li C | 無構造 | 1.8 | 強 | 小 | 34.8 | 4.2 | 0.4 | 1291 |
| 第2層 | 16~30cm | 黒褐(10YR 3/2) | Li C | 無構造 | 2.2 | 強 | 小 | 29.6 | 4.0 | 0.3 | 1286 |
| 第3層 | 30~52cm | 黒褐(7.5YR 2/2) | Li C | 無構造 | 1.3 | 強 | 小~中 | 31.7 | 10.9 | 0.6 | 793 |
| 第4層 | 52~100cm (黒泥層) | 黒色(7.5YR 1.5/2) | CL | 無構造 | 6 | 強 | 中 | - | - | - | - |

収穫期の旋回作業などは困難であった。

2. 設計の概要

1) 弾丸暗きよの施工: 1968年3月大型トラクターで間隔1m・深さ35cmで黒泥層の上に施工し, これに隣接して対照区(無施工区)を設定した。なお施工直後のきよ孔はほぼ円形に近い形状をなし, その大きさは直径で約8cm前後であった。

2) 供試作物と品種: 水稲(日本晴)

3) 試験規模: 1区1a (10m×10m) 1連制

4) 試験区名と施肥量: 区名と施肥要素量は第2表のとおりである。なお珪カルは初年度に30kg/a・堆肥は毎年75kg/aを施用した。

第2表 試験区名と施肥要求量(kg/a)

| 区名 | 施肥要素量 | | |
|-----|-------|-------------------------------|------------------|
| | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| 対照区 | 0.75 | 1.20 | 1.0 |
| 施工区 | 1.20 | 1.20 | 1.0 |

5) 調査項目とその方法: きよ孔の状況と施工による土壌の変化(Eh・減水深・土壌三相・断面の形態変化・土壌の地耐力)および稲作の収量などを主体に調査した。その方法は農林省振興局地方保全資料1および6に基づいた分析と調査法をとった。その他の項目については結果の項で記述することにした。

6) 耕種概要: 稲総地区実施計画書に基づいて実施した。このうち特に本試験と関連性の高いものについて述べれば次のようである。すなわちこの地区は用水系別の栽培区を設定し、

品種・作期などを統一しながら集団組織による計画的な水管理を実施している。

III 試験結果

1. 弾丸暗きよの状況

きよ孔の状況は毎年水稲収穫後に試抗し, その状況を記載するとともに写真撮影を行なった。このうち主要なものについて掲載したものが写真2・3である。

きよ孔は年々微粒質な土粒を孔内に沈積しながら縮小の傾向がみられたが, 水稲3作後の用水路よりのきよ孔は写真2のようにほぼ円形に近い形状でその大きさは直径で約5cm内外を維持していた。なお排水路に近いきよ孔は写真3のように用水路よりも土粒の沈積状況は著しく孔内に約6~7割充填していた。

この沈積物の表面と孔壁面には薄いすきまがみられ, その各々の表面には酸化鉄の被膜を形成し容易に剥離する状態になっていた。この沈積物の粒径組成は第3表のようで, 作土および次層の粒径と大体同じ組成をもっていた。

第3表 孔内沈積物の粒径組成(%)

| 粗砂 (2.0~0.2mm) | 細砂 (0.2~0.02mm) | シルト (0.02~0.002mm) | 粘土 (0.002mm>) |
|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| 7.2 | 23.1 | 36.9 | 32.8 |

2. 施工による土壌の変化

1) 湛水時のEhおよび減水深

水稲生育途中のEh測定結果は第4表のようであった。この測定法は口径約10cm・深さ15cmのブリキ製円筒を各区3カ所(施工区はきよ孔

間の中央部)より採土し、東亜電波製の計測器で測定した平均値である。

これからみた対象区と施工区のEhの差は判然としなかった。これは1つにはきょ孔間の中央部であったこと、およびこの地区の集団組織による計画的な水管理などが功をそうしたためと思われる。

第4表 Ehの変化 (Eh, mv)

| 年月日 区名 | 1968 | | | 1970 | | |
|-----------|------|-----|------|------|------|------|
| | 6.12 | 7.4 | 7.15 | 6.17 | 7.11 | 8.18 |
| 対照区 | 54 | 94 | 16 | 36 | 33 | 145 |
| 施工区 | 80 | 83 | 46 | 56 | 45 | 159 |

注. 施工区の測定場所はきょ孔間の中央部

次に減水深についてみると第5表のとおりであった。対照区は9~14mm/dayに対し、施工区は12~22mm/dayと測定値に巾がみられ、これらの平均値の差でみると約6mm/dayであった。

この減水深の測定はきょ孔間の中央部6カ所をN型減水深測定法に準じて行なった。従ってこれをきょ孔の直上部あるいは一筆減水深などで比較するともっと大きな差がみられたのではないかと思われた。

第5表 減水深 (N型 mm/day)

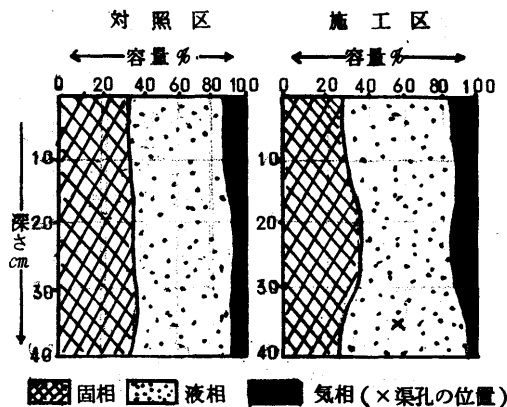
| 年月日 区名 | 1968 | | | 1970 | | 平均値* |
|-----------|------|-----|-----|------|------|------|
| | 6.12 | 7.4 | 6.5 | 7.14 | | |
| 対照区 | 12 | 11 | 10 | 12 | 11±3 | |
| 施工区 | 16 | 17 | 15 | 18 | 17±5 | |

注. 1. 各測定日の減水深は6カ所測定した平均
2. *印の平均値とその標準偏差の度数は24

2) 土壌三相

・ 水稻3作目の収穫時、地表面から5cmきざみで各3点ずつ採土し実容積測定器で測定した結果を図示したものが第1図である。

土壌三相で特に顕著な差異をみたのはきょ孔周辺部の第3層で、施工区は無施工区に比較し液相容量は増大し、気相容量が減少していた。これはきょ孔が表層の土壤水を吸水し、排除の

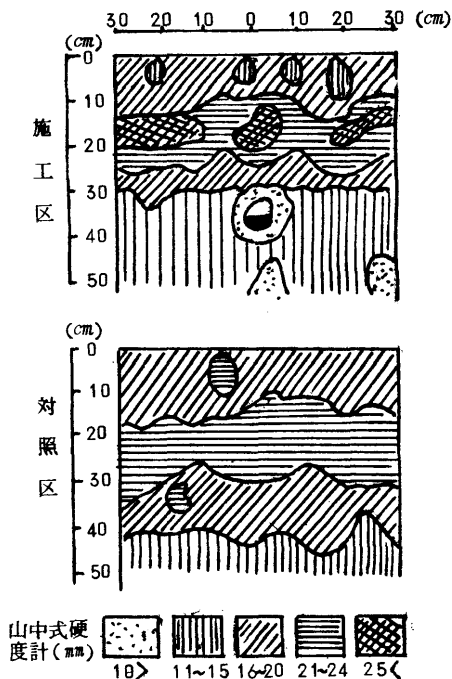


第1図 水稻3作収穫時の土壌三相状態

役目を果し、土壌の乾燥化を促進している様子が見られた。

3) 土壌断面の形態変化

水稻3作後の断面調査で顕著な差異をみたのは、層界・構造・孔隙・き裂・斑鉄の形状および



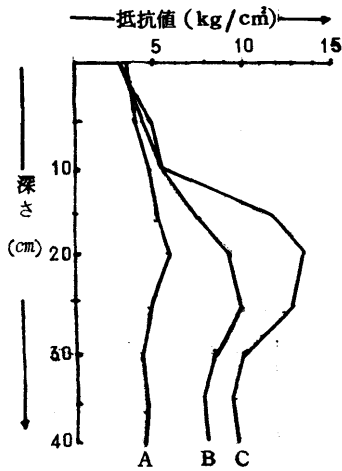
第2図 水稻3作収穫後のち密度分布

第6表 水稻3作後の断面形態の変化

| 層位 | 項目 | 対 照 区 | 施 工 区 |
|-----|-----|----------------|----------------|
| 第1層 | 層 界 | 判 然 | 明 瞭 |
| | 斑 鉄 | 雲状斑とむ、膜状斑あり～含む | 雲状斑含む、膜状斑とむ |
| 第2層 | 斑 鉄 | 雲状斑あり、膜状斑含む | 雲状斑なし、膜状斑含む～とむ |
| | 構 造 | 塊状構造(発達程度弱) | 塊状構造(発達程度中～強) |
| | 孔 隙 | 細孔・小孔含む | 細孔～小孔とむ |
| | き 裂 | なし | あり |
| | ち密度 | 2.2 | 2.4 |
| 第3層 | 孔 隙 | 細孔・小孔・中孔あり | 細孔・小孔・中孔あり～含む |
| | き 裂 | なし | あり |

びち密度などであった。すなわちその差異はきよ孔上部の作土および次層で、層界は明瞭化し、構造・孔隙およびき裂は発達し、雲状斑は消失し膜状斑が含むからとむの状態に変わり、ち密度は密と化した。きよ孔の周辺部およびその下層については大きな差異はみられなかった。

次に断面調査の際、5cm方眼に山中式硬度計でち密度を測定した結果を図示したものが第2図である。施工区は次層に特に密な層が部分的



A: 施行直後(1968.4.25.調査)
B: 対照区 (1971.1.18. ")
C: 施工区 (1971.1.18. ")

第3図 施工3ケ年後のコーン貫入抵抗値

に発達していることが特徴的であった。

4) 土壌の地耐力

施工3カ年経過後、SR-II型の土壤抵抗測定器でコーンの貫入抵抗を測定した結果は第3図である。

対照区も年次の経過とともに土壌の地耐力は増大する傾向がみられたが、施工区はより土壌の地耐力は増大し、機械化の点からもかなり改善され容易になっていることが裏書きしている

3. 稲作の収量

連年の玄米収量とその指数は第7表に示した。施工による稲作収量への効果は明らかでなかったが、施肥増施による水稻の生育状況をみると、対照区は施工区に比較し下葉の枯死葉は若干多く、成熟期の熟色もやや悪く過繁茂のきらいが、あって倒伏寸前の状態にあり、窒素1.20 kg/aが限度と思われた。

第7表 連年の玄米収量と指数 (kg/a %)

| 収 量 | 区 名 | 対 照 区 | | 施 工 区 | |
|-----|------|--------|--------|--------|--------|
| | | N-0.75 | N-1.20 | N-0.75 | N-1.20 |
| 第1作 | 玄米重 | 60.6 | — | 62.0 | — |
| | (指数) | (100) | (—) | (102) | (—) |
| 第2作 | 玄米重 | 51.0 | 55.0 | 51.3 | 55.2 |
| | (指数) | (100) | (108) | (101) | (108) |
| 第3作 | 玄米重 | 51.6 | 51.8 | 52.4 | 53.6 |
| | (指数) | (100) | (101) | (102) | (104) |

これに対し施工区は、植付後約50日前後にややむら出来し易い傾向がみられたが、対照区のような様相（下葉の枯死葉・熟色・過繁茂など）はみられなかった。

IV 考 察

水田の排水改良について、山崎¹⁸⁾は作物の生産¹⁰⁾性と農業機械の運行の面から意義づけし、中川は水田の高度利用と労働生産性および水稻生産力の増強などに大別し意義づけしている。

筆者らも農業の近代化は土地生産性と労働生産性の向上が前提条件であると思われるので、この施工を作物生産性の増大（生産阻害要因の消去もしくは軽減）と機械化適性の増大の面から意義づけし考察を試みるが、そのまえにきょ孔の状況についてふれておく。

1. きょ孔の状況とその耐用性について

きょ孔の状況はすでに試験結果の1で述べたように施工直後はほぼ円形に近い形状でその大きさは直径で約8cm前後であったが、水稻3作後は約5cm内外の直径であった。またこのきょ孔には年々微粒質な土粒が沈積し、その状況は用水路よりも排水路が著しかった。

永石⁹⁾は有明干拓地の水田で弾丸暗きょの踏圧試験を行ない、このときの穿孔体の断面積に対するきょ孔の断面積の比率をもってこれを「作孔効果」と仮称し、このときの作孔効果は約50%であったと報じている。

筆者らもこれにしたがい施工直後のきょ孔についてこれを試算してみると、その作孔効果は約53%の値であった。また水稻3作後のきょ孔について穿孔体の断面積に対する比率をみると21%であった。

このようにきょ孔は年次の経過とともに縮小する傾向がみられたが、これを仮りにそのきょ孔の断面積の縮小率が等速的（年々同比率で縮

小）であったとすれば、この試験で行なったきょ孔の断面積は $53 \cdot 37 \cdot 21 \cdot 5 \text{ cm}^2$ と縮小し、5作後には完全に閉塞することになる。しかしこれはあくまでも仮定の上であって、現実には土粒の沈積なども加わるのでこれより短い年月になるのではないと思われる。

国分⁴⁾らは長野県と千葉県¹⁵⁾の重粘土質水田で有材・無材の弾丸暗きょを施工したところ、千葉県¹⁵⁾のもの¹⁵⁾は1作後、長野県¹⁵⁾のものは2作後に無材きょ孔は崩壊したと報告している。また筆者らの一人は栃木県二宮町の灰褐色土壤粘土質の整備田にこれを施工したところ、2作後には崩壊していたとの成績を出している。

このように弾丸暗きょのきょ孔は土地条件や土壤条件および施工条件などによって種々のケースがみられるが、このきょ孔の閉塞原因をみると次の3つの要因型に大別されるようである。1) きょ孔自体の収縮による閉塞。2) 孔壁の崩壊による閉塞。3) 土粒の沈積物による閉塞などで、1)と2)は主として土壤条件や施工条件および大型機械の踏圧などが関係し、3)は孔内の流速いかえれば整備などによる圃場の不均平が要因となり孔底の起伏および排水路の水位などによって影響され易いようである。そしてこの状況は一般に前記3種が個々に進行するケースは少く、むしろ2種あるいは3種の複合型で進行する場合が多い。本試験のきょ孔は1)と3)の複合型に属する。

このきょ孔の耐用性を高める方法として、中村¹¹⁾は光弾性実験から円形穿孔体の欠かんを指摘し、理想形として卵形穿孔体を提唱した。永石⁹⁾は作孔効果ときょ孔の縮小から断面積の大きい穿孔体を使い、位置は浅くても強度の大きい層へ施工すべきだと報じている。また山崎¹⁸⁾は永石⁹⁾らの云うほかに施工後の維持管理などをとえている。

今後は安易に出来るこの施工法の耐用性向上のために、種々の条件下でさらに検討する必要があると思われる。

2. 施工による稲作収量への効果について

連年の収量調査成績からみると施工前よりは高収量を得たが、対照区との収量差は判然としなかった。これはさきにも述べたようにこの土壤区全体に弾丸暗きょが施工され、その中に比較的少面積の対照区を設定したこと、および集団組織による計画的な水管理を実施したため、この土壤区の生産阻害因子である根腐れ障害などを軽減したためと思われる。このことは稲作時のEhの変化などからも裏付けされている。したがってこのような物理性の改善試験には大圃場をもって実施しなければはっきりしないものと思われる。

次に筆者らは作物生産性からみたこの施工法の意義については次のように考えている。すなわちきょ孔の状態はさきに述べたように年次の経過とともに縮小・崩壊または沈積物による閉塞と云う運命が早かれ遅かれ必然的にあって、きょ孔自体の排除効果はいずれ消失することは明白である。しかし施工当時の穿孔体支持板による機械的き裂やその後に発達したき裂などは容易に消失することはないので、きょ孔自体が崩壊閉塞しても土壤全体からみればこの効果は大きいものと思う。

筆者らはこれらの施工効果を「直接効果」と「間接効果」の二種に大別してみた。前者はきょ孔自体がもつ吸水・排除の効果であり、後者は施工後の土壤変化にともなって発達した構造空隙およびき裂などのことで、これらは水稻の生産阻害因子を消去もしくは軽減と云う回避効果がある。前者の直接効果は土壤条件や施工条件などによってその年限は異なるが、大体3～5年と推定される。一方後者の間接効果は永続性を有し相当期待出来るものと思う。

次に施工後の肥培についてみると、初年度から3年目の水稻は植付後約50日前後にむら出来し易い傾向がみられるので補正肥が必要である。また施肥量については水稻の生育経過や土壤の変化などからみて、特に元肥窒素は慣行量の2～3割の増施が必要であると推定した。

3. 施工による水田の地耐力について

水田の地耐力は土壤の含水量によって左右され、地下水位との関連が強い。そして含水量の高い湿田や半湿田は機械化作業は著しく制限を受ける。小叢は黒泥土壌は概して地下水位が高く湿田または半湿田の性格が強いとしている。

この湿田や半湿田などの区別は横井¹⁹⁾の定義もあるが、中川¹⁰⁾は非かんがい期の地下水位の高低と土壤の含水状態、および農業土学的見地からその現象をもたらした水利的条件や土壤の透水性などからの統一的な観点に立ってこれを規定する必要があると述べ、さらにこれを地形的・土壤的条件などから細分しその排水改良法を論じている。これらの湿田や半湿田は排水改良によって土壤の地耐力^{3, 8, 13, 18)}は増大し、機械走行性は向上すると報じている。

筆者らは機械化作業が容易でなかった黒泥土壌に弾丸暗きょを施工し、この結果を機械走行性との関連で考察してみると次のようである。

対照区も年次の経過とともにコーンの貫入抵抗値は増大する傾向がみられたが、施工区はよりコーンの貫入抵抗値は増大した。この対照区のコーンの貫入抵抗値などが増大する傾向がみられた理由としては、さきにもふれたように、この土壤区全体に弾丸暗きょが施工され、その中に対照区を設定したこと、および集団組織による水管理などが影響したためと思われる。

根岸⁸⁾らは耕地地耐力の研究で、排水による土層の乾燥・酸化が土壤の密度や構造を発達させるので、地耐力の強化策としては排水・乾燥および酸化の条件とその期間が必要であるとし、

また中ばし期以降の水管理の重要性を指摘している。本村・横井らは水田土壤中の鉄の行動と役割を研究し、その中で排水は土壤水分を減少させるとともにたてのき裂を促進し、つづいて2価鉄の可動化それにとまなう酸化沈積物が土壤粒子間の連結力を強め、土壤構造の生成・発達およびその安定化とともに透水性や地耐力などの改善手段の有用さを報じている。

これらのことからこの施工区の地耐力についてみると、施工前は層位の分化も不明瞭で構造・孔隙およびき裂などは未発達であったが、施工によって土壤の断面形態は顕著に変わり、コーンの貫入抵抗値なども増大し、乾田化の方向に進行しているようすがうかがわれた。

これは施工当時の穿孔体支持板による機械的なき裂ときょ孔自体の吸水・排除の効果がまず土壤の乾燥化を促進したため、土壤は乾燥・収縮⁸⁾などが強まり、これが二次的に派生し根岸・本村・横井⁶⁾らがいう自然的なき裂や土壤構造などの発達をうながしたためと思われる。

このことは水の動きを助長し物質の溶脱や集積作用を強め、層位の分化と土壤の構造・孔隙および密度などを発達させ、結果としてコーンの貫入抵抗値などを増大させたものと思われる。このことは土壤の三相状態や断面形態の変化および圃場の乾き具合などからも推察される。

以上のことなどから弾丸暗きょの施工は、機械走行性と関係する土壤の物理性の改善に効果あることが認められた。

V 摘 要

1967年「稲作総合改善集約指導地」が栃木県小山市今里地区に設置され、この事業実施にあたって各種対策事業が実施されたが、その一つに弾丸暗きょが施工された。これはこの土壤の特徴が、土性は粘質から強粘質で内部排水が不良で水稻は根腐れ障害のおそれ多いため、その

物理性の改善のために実施された。筆者らはこの効果確認と施工後の肥培管理ならびに農業機械に対する地耐力などについて、1968年から1970年までの3年間試験を行なった。

1. きょ孔は年々縮小されたが、水稻3作後のきょ孔は直径で約5cm内外を維持していた。
2. 施工による土壤の変化としては、作土および次層の構造・孔隙・き裂・斑鉄・密度および土壤三相などに顕著な変化がみられた。
3. 稲作の収量への効果は明らかでなかった。
(これはこの土壤区全体に弾丸暗きょが施工されたこと、および集団組織による計画的な水管理などが影響したためと思われる。)
4. 施工による土壤の変化にとまなうて、圃場の乾き具合は良くなり、またコーンの貫入抵抗値などは増大し、機械走行性と関係する土壤の物理性の改善に効果あることが認められた。
5. 施工初年度から3年目にかけてはむら出来し易いので補正肥が必要である。またその後の肥培については、水稻の生育経過や土壤の変化などからみて、特に元肥窒素は慣行量の2~3割の増施の必要を推定した。

VI 引用文献

1. 川田則雄：土壤肥料全編，882～885，養賢堂（1960）
2. 小坂二郎：土壤の種類と施肥技術，50，農業技術協会（1963）
3. 国分欣一・他：土壤の物理性15，15，（1966）
4. 国分欣一・他：土肥要旨集18，支部24～25（1972）
5. 森 哲郎：土壤肥料新技術，244，技報堂，（1969）
6. 本村 悟：土肥要旨集16，158，（1970）
7. 宮城県農業試験場：水田高度利用促進のための基盤改善に関する研究，（1971）
8. 根岸久雄・他：農土試報8，108～111，（1970）

9. 永石義隆：農土試報 6, 111 ~ 123, (1968)
10. 中川昭一郎：農土試報 2, 19~80, (1964)
11. 中村六史：農土試報 5, 205 ~ 224, (1967)
12. 農林水産技術会議：大型機械化に伴う水田基盤整備に関する研究, 2~223, (1969)
13. 農林水産技術会議：重粘土地帯水田の土層改良と用排水組織に関する研究, (1972)
14. 栃木県：稲作総合改善集約指導地実施状況および結果の概要 (小山市), 11, (1967)
15. 栃木県農業試験場：地力保全現地試験成績書, 19, (1971)
16. 内田文雄・他：土肥要旨集 18, 支部 25, (1972)
17. 内山修男・他：農技研報 B 3, 43, (1954)
18. 山崎不二夫：農地工学 (上), 189 ~ 280, 東大出版会 (1971)
19. 横井時次：土壤肥料新説, 109, 養賢堂, (1952)
20. 横井 肇・他：農技研 (重粘土 1), 1~97 (1969)
21. 米田茂男・他：土肥誌, 39, 1, (1968)

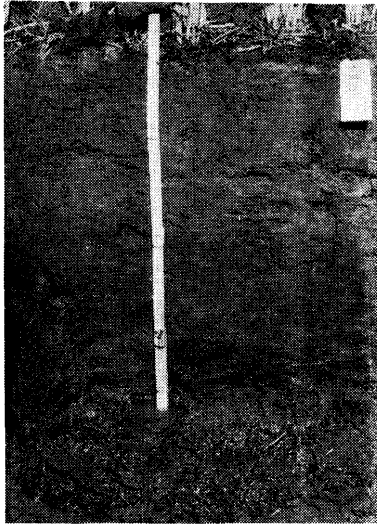


写真1 对照区

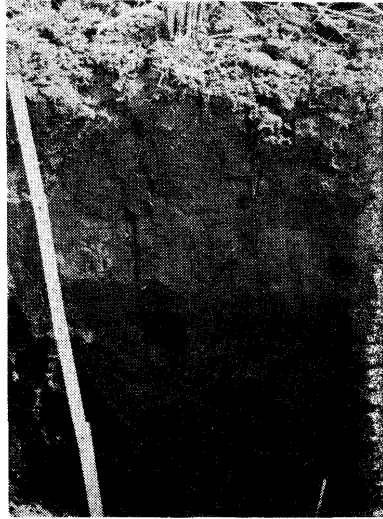


写真2 施工区



写真3 きよ孔内の沈積状況



写真4 土壌構造の発達状況

写真 水稻3作後の状況