

## 黒ボク土の心土を用いた圃場造成に伴う 土壌団粒構造の変化

盧 鋼\*・坂上寛一\*・山岸順子\*\*・田中治夫\*

Changes of Soil Aggregation Structure in the Subsurface  
 Andosols after Being Reclaimed for Arable Land

Gang Lu\*, Kan-ichi SAKAGAMI\*, Junko YAMAGISHI\*\* and Haruo TANAKA\*

\* Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

\*\* University Farm, Faculty of Agriculture, University of Tokyo

### Abstract

Wet-sieving test in combined with disaggregating pre-treatments (from gentle to vigorous) were applied to investigate the change in soil structure of subsurface Andosols after being reclaimed for arable land. Aggregates of subsurface soil under natural condition was utterly stable to slaking, and stable to oscillation disruption to some extent. In contrast, the aggregates in the reclaimed soils appeared to break down gradually into smaller aggregates as pre-treatment being intensified. These facts indicated that the aggregate hierarchy existed in the reclaimed soil, while in the natural subsurface soil, structure characteristic was more like clod. Soil organic C was showed to be increased with cropping and fertilization practice, while free iron oxides in the soil was decreased. Iron oxides contents in the aggregates and result of deferration experiment indicated that the iron oxides was the predominate stabilizing agent of the natural subsurface soil. However, the role of iron oxides on the stabilization was very weak in the reclaimed soil. Organic C content was constantly high for the small aggregates, which suggests the increase of smaller aggregates in the reclaimed soil may be attributed to the increase in organic matter in the soil. It was concluded that by reclamation, natural subsurface soil which contained large amount of iron oxide cemented clod could be turned into well aggregated soil.

**Key word** : Subsurface Andosols, soil ripening, water-stable aggregate, organic matter, iron oxide

### 1. はじめに

有機物が多く集積している黒ボク土の黒色表土では、内部孔隙に富む団粒が形成され膨軟である。それに対して、黒ボク土下層の有機物の少ない赤褐色心土では、一般に堅密であり、土壌がしまっている。このように黒ボク土の表土と心土では物理性が大いに異なる。ところで、黒色表土が侵食によって剥奪され、心土が耕作土として使われることがある。また、近年客土として心土が利用されることも珍しくない。したがって、心土を耕作

土として利用する際の諸問題、またその熟畑に伴う土壌の変化を明確に把握することは、今後の心土の利用を考える上で重要であると思われる。ここでは、とくに土壌団粒構造の面から論議する。

土壌団粒は土粒子の集合体であり、その団粒の形状、大きさおよび安定性などは土壌の構造を規定し、更には土壌の通気性、透水性を支配し、風食、水食に対する抵抗力などにも影響を及ぼし、土壌生産性あるいは作物の生育などと密接に関わっている。団粒構造の発達した土壌では団粒階層 (aggregate hierarchy)、つまり、高次

\*東京農工大学農学部 〒183-8509 府中市幸町 3-5-8, \*\*東京大学農学部附属農場 〒188-0002 出無市緑町 1-1-1  
 キーワード: 黒ボク土心土, 熟畑化, 耐水性団粒, 有機物, 酸化鉄

な大団粒はより低次な小団粒から構成される構造様式がよく認められる (Kay, 1990)。一方、土塊は単なる一次粒子の集合体であり、その内部には土壌生成によって形成された団粒境界面が明瞭には認められない (Soil Survey Division Staff, 1993)。Tisdall and Oades (1982) は草原土壌の構造について論じ、低次小団粒 (直径 0.25 mm 以下) は植物の根および糸状菌の菌糸の binding によって高次大団粒 (直径 0.25 mm 以上) を形成すると指摘した。また、小団粒は腐植物質などの接着剤によって安定化され、その結合力は根、糸状菌菌糸によるものより強く、小団粒は一般に大団粒より安定性は高いと述べた。Oades and Waters (1991) は破壊強度の異なる耐水性団粒分析法を用いていくつかの土壌の構造の特徴を検討した。その結果、有機物が団粒の主要な接着剤であるアルフィソルとモリスソル土壌においては団粒階層の存在が確認でき、酸化物が主要な接着剤であるオキシソル土壌においてはその存在が認められなかった。

水中篩別法 (Yoder, 1936) は団粒の分析にもっとも多く用いられている手法である。しかし、生土或いは風乾土だけを用いて水中篩別する場合は、得られた団粒は高次の構造を持つものもあれば、単なる一次粒子の集合体 (土塊) である可能性もある。そこで、団粒分析に破壊力の異なるいくつかの前処理を用いて、耐水性団粒の安定性を多角的に検討することを試みた。ここでは前提として団粒構造の発達した土壌であれば外部負荷の増加に伴い、大きな団粒はより小さい団粒に分離・破壊することが認められるだろうと仮定している。

本研究の目的は上述の手法を用いて黒ボク土心土を耕作土とする圃場造成の前後や、造成後の施肥管理の相違などによる耐水性団粒構造の変化をより明確に把握することである。また、その団粒構造の変化は団粒接着剤とされている有機物や酸化物などの変化によるものか否かについても検討した。

## 2. 供試土壌および方法

### 供試土壌

東京大学付属多摩農場 (東京都田無市) では 1978 年に黒ボク土の黒色表土の他に、赤褐色心土 (立川ローム層の最上層、ソフトローム層に相当) を用いて耕作土とする圃場造成を行った。1979 年はトウモロコシ-大麦による均一栽培を行い、1980 年以降はトウモロコシ-大麦-大豆-大麦の 2 年 4 作付け体系を採用し、家畜糞堆肥、化成肥料を単用あるいは併用する試験区を設け、栽培試験を継続した (山岸・松崎, 1997)。本研究では試験区のうち造成後の心土無肥料区①、心土化成肥料・堆肥区② (堆肥 60 t/ha、窒素肥料は、トウモロコシ: 120 kg/ha、大

麦: 120 kg/ha、大豆: 30 kg/ha) および黒色表土の化成肥料・堆肥区③ (施肥は前記と同様) の土壌を用いた。また、圃場造成に用いた心土④も採取した。以上の試料は図表に表示するとき、それぞれ心土無肥料、心土化成肥料・堆肥、黒土化成肥料・堆肥、造成前心土の略称を使った。生土状態で大きな塊を指先で割れ目から砕き、8 mm の篩いをとおり、供試するまで低温室 (5°C) に保存した。

### 実験方法

#### 1) 耐水性団粒の測定

供試土壌に対して異なった 4 種の前処理を施し、それぞれ処理後の試料について水中篩別装置 Yoder 器 (1 分間 20 回上下運動、振とう幅 3 cm) を用いて、45 分間の水中篩い分け (水道水を使用) を行った。前処理の内容は下記のとおりである。

- A 生土処理: 生土を水道水に 10 分間浸漬静置する
- B 風乾処理: 生土を風乾する (いわゆる沸化作用を受ける)
- C 振とう処理: 100 mL のポリ瓶の中に風乾土 10 g と 50 mL 蒸留水を加え、振とうする (1 分間 80 回、振幅 2.5 cm 往復振とう、2 時間)
- D 超音波処理: 100 mL のビーカーに 10 g の風乾土と 50 mL の蒸留水を加え、超音波をかける (出力 80 W, 5 分間 2 回)。

各前処理が土壌団粒に加える破壊力は  $A < B < C < D$  の順に増加する。

Yoder 器による水中篩い分けでは土壌団粒を 2-8 mm, 1-2 mm, 0.5-1 mm, 0.25-0.5 mm, 0.1-0.25 mm および 0.1 mm 以下の 6 画分に分ける。105°C 乾燥重に基づいて各粒径団粒の割合を求める。4 連データの平均値によって団粒分布と平均重量直径 (Kemper and Rosenau, 1986) を算出し、団粒の安定性を論議した。

#### 2) 各 pF 範囲における土壌水分量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3\%$ )

採土管の不攪乱土壌試料につき加圧板法 (pF 1~pF 3) と遠心法 (pF 3~pF 4.2) により、土壌水分特性曲線を求めた (土壌標準分析・測定委員会, 1986)。各 pF 値の含水量には三連データの平均値を使った。pF 3 の含水量は加圧板法と遠心法の値はほぼ同じであるため、加圧板法の値を使った。

#### 3) 炭素、窒素

試料の炭素、窒素含量は乾式燃焼法で NC-ANALYZER (SUMITOMO 工業) を用いて測定した (土壌標準分析・測定委員会, 1986)。

#### 4) 鉄・アルミニウム・ケイ素

ジチオナイト-クエン酸ナトリウムおよび、酸性シュウ酸アンモニウムにより選択溶解、抽出された鉄、アルミニウム、ケイ素 (Reeuwijk, 1993) について、点滴-蛍光 X

線分析法(丸茂, 1992)を用いて測定を行った。

5) 脱鉄処理

7gの2~8mmの風乾団粒を50mlの0.4Mジチオナイト(Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)溶液中に7日間浸漬後、1)と同様に45分間水中篩別を行い、団粒分布と平均重量直径を求めた。脱鉄処理でのナトリウムの分散作用を考慮して0.4M硫酸ナトリウム(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)に浸漬する対照を設けた。また、併せて蒸留水浸漬処理を設けた。

3. 結果と考察

耐水性団粒, 土壌水分特性曲線

耐水性団粒の粒径分布は前処理によって著しく影響を受け変化した(図-1, 図-2)。生土処理では造成前心土で2mm以上の大団粒が若干多く平均重量直径が大であるが、3種の造成後土壌の耐水性団粒分布および平均重量直径はほぼ同様であった。しかし、風乾処理では各土壌の耐水性団粒分布は大きく異なった。造成前心土は2mm以上の耐水性大団粒がもっとも多いが、造成後は心土無肥料区、心土化肥・堆肥区、黒色表土化肥・堆肥区の順に2mm以上の大団粒が減少し、0.5mm以下の小団粒が増加した。振とう処理では2mm以上の大団粒は

同様な傾向が認められたが、小団粒については造成後3土壌間で大差がなかった。超音波処理では供試した4土壌の団粒は大きく崩壊し、4土壌の平均重量直径はほぼ同じであった。

各処理間の耐水性団粒分布の比較から、造成後の土壌は前処理の強さが増加するとともに大団粒は徐々に崩壊し、より小さい団粒に分離する傾向が明瞭に認められた。しかし、造成前心土は対照的であり、生土と風乾処理の間では差異がなく、強い振とう処理でもなお大団粒はかなり残り、高い安定性を示した。

また、水分特性曲線(図-3)も心土の造成前後で大きく異なり、構造の相違を示した。造成前心土に比べ、造成後の心土土壌はpF 4.2以上の含水量が少なくなり、pF 1~2での含水量が多くなった(表-1)。

以上の結果から造成後心土の構造は微細孔隙が減少するとともに粗大孔隙が増加し、造成前心土のそれと大きく変化したことが判明した。ここで注目したいのは生土処理と風乾処理における造成前後心土の団粒安定性の違いである。造成前心土は風乾処理による沸化作用によっても団粒の崩壊がほとんど認められないだけでなく、振とう処理でもなお大団粒はかなり残っており、安定な構

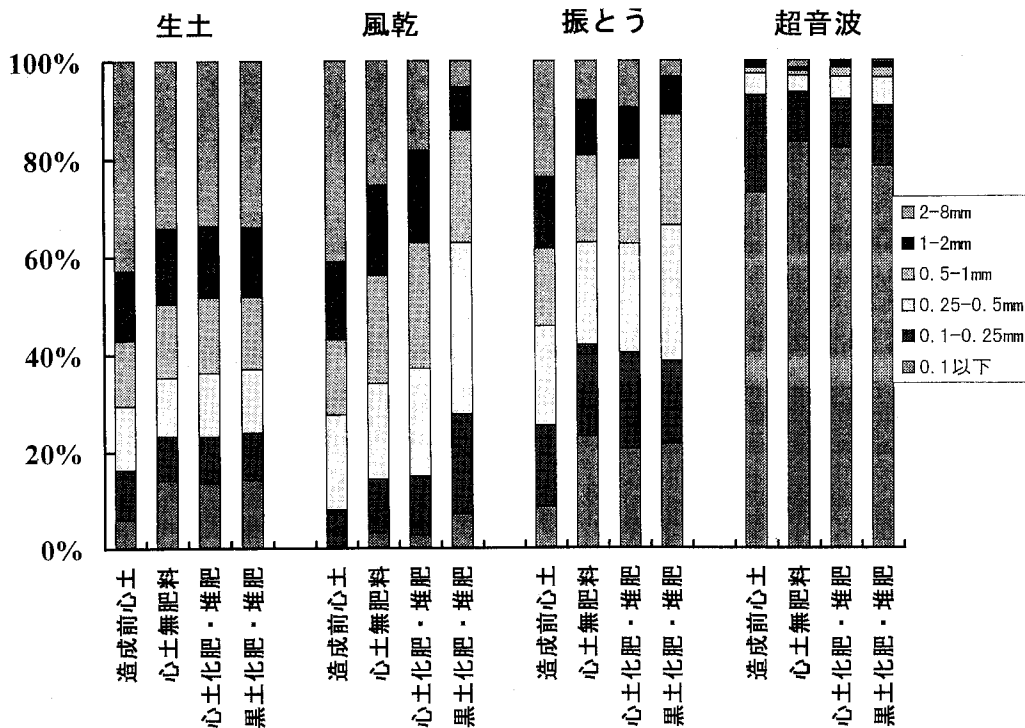


図-1 前処理に伴う耐水性団粒の粒径分布の変化

Fig. 1 Water-stable aggregate size distribution under different pre-treatment

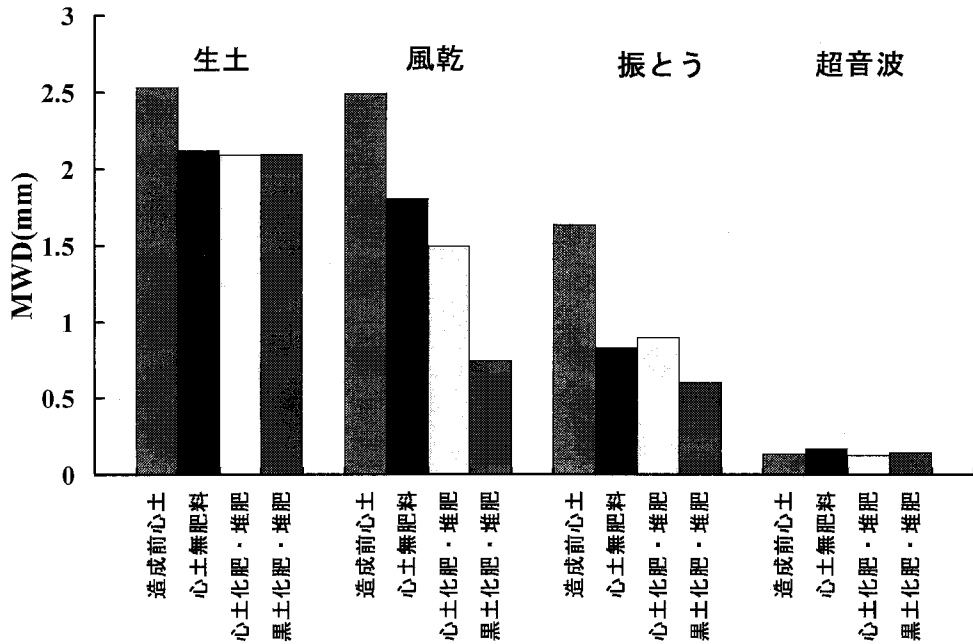


図-2 前処理に伴う耐水性団粒の平均重量直径の変化

Fig. 2 Mean weight diameter of water-stable aggregates under different pre-treatment

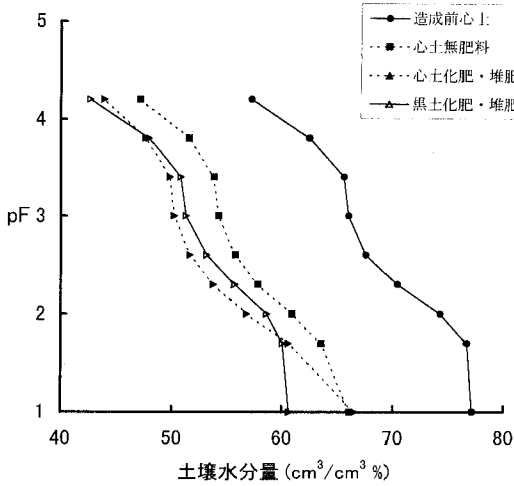


図-3 土壌水分特性曲線

Fig. 3 Soil moisture characteristic curve

造であった。一方、造成後心土では生土処理で安定した大団粒は沸化作用によって容易に小団粒に分離され、もっと強い振とう処理では団粒が更に小さい団粒に崩壊した。これらの事実では造成後の心土の大団粒は高次団粒の特徴を持っており、それに対し造成前心土の大団粒は沸化作用によって分離される団粒画分を欠き、団粒内部の構成はより簡単であることを示唆している。

火山灰土壌における団粒分布と孔隙分布との相関については古畑・林 (1980) の研究で検討されている。彼らの研究では塊状構造のある土壌には微細孔隙 (pF 3.9 以上) がより多く含まれ、微細孔隙と大団粒との相関が高いと報告した。本研究では、造成前心土に比較的多い微細孔隙はおそらくその大団粒内部に多く含まれる微細孔隙とかがわっていると推測する。一方、造成後心土では風乾処理で分離した小団粒は生土の状態では緩く結合しあって大団粒の中に留まり、高次の団粒になっている。このような構造の変化は造成後心土における微細孔隙の減少並びに粗大孔隙の増加をもたらしたと考えられる。

以上のように造成前心土の大団粒は壊れにくく緻密な集合体であり、小団粒に分離しにくいことからむしろ土壌に近いと言えよう。造成後心土では微細孔隙が少なく、粗大孔隙が多く、団粒構造の発達が進んでいると考えられる。沸化による団粒の崩壊・細粒化は黒色表土でも顕著にみられた。このことは心土が耕作土になり、熟化化によってもとの構造性を失い、団粒化が進み、構造上は黒色表土の特徴に近づいているようにみられる。

土壌有機物、酸化物の含量と団粒安定性

造成前後で団粒の安定性に大きな変化がみられたことは団粒内部結合力に変化が生じたことを示唆し、団粒の接着物質に何らかの変化が起こったことが考えられる。そこで、団粒接着物質の可能性のある有機物と酸化物の

表-1 各 pF 範囲における土壌水分量 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>%)

試料	重力水 (pF 1~2)	易効性水分 (pF 2~3)	難効性水分 (pF 3~4.2)	非有効水分 (pF >4.2)
心土	2.9	8.3	8.8	57.2
心土無肥料	5.2	6.6	7.1	47.1
心土化肥・堆肥	9.8	6.6	6.3	43.9
黒土化肥・堆肥	2.1	7.3	8.6	42.6

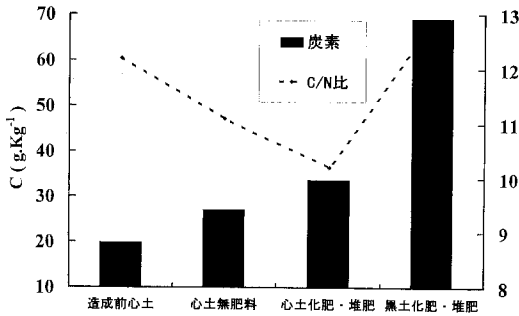


図-4 各土壌処理区の炭素量, C/N比

Fig. 4 Organic C and C/N ratio of the soils

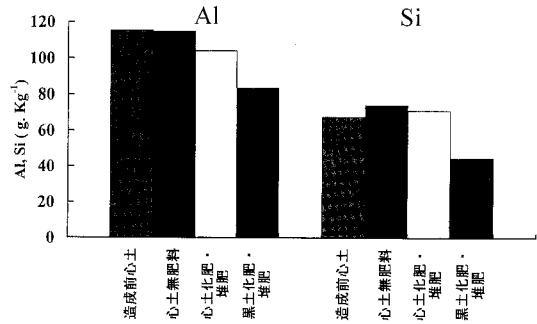


図-5 酸性シュウ酸アンモニウム可溶 Al, Si

Fig. 5 Acid oxalate extractable Al and Si in the soils

増減を調べた。

炭素量は造成前心土, 心土無肥料区, 心土化肥・堆肥区の順に多くなった(図-4)。心土では造成後作物の栽培開始とともに有機物が集積し, 堆肥や化成肥料の施用によって更に有機物が増加することを示した。一方C/N比は造成前心土, 造成後の心土無肥料区, 心土化成肥料・堆肥区の順に減少した。造成後の作物の栽培履歴(例えば大豆の窒素固定), 堆肥ならびに窒素肥料の施用による熟畑化の影響と考えられる。

シュウ酸-シュウ酸アンモニウム可溶の Al, Si の量は造成前後の心土にいずれも黒色表土より多く含まれているが, 心土三土壤の間には大きな差異はなかった(図-5)。造成後の熟畑化によるアロフェン生成量の変化はあまりないことになる。選択溶解によって抽出した遊離酸化鉄(ジチオナイト-クエン酸ナトリウム可溶, Fed) と非晶質酸化鉄(酸性シュウ酸アンモニウム可溶, Feo) の含量を図-6 に示した。造成前後心土の非晶質酸化鉄の含量はそれほど変わらないが, 遊離酸化鉄の含量は造成前の心土, 心土無肥料区, 心土化肥・堆肥区の順に減少して, 炭素量と逆の傾向を示した。酸化鉄の活性度 (Feo/Fed) は炭素量の傾向と一致し, 有機物集積に伴って, 活性度が高くなっている。このことは有機物が鉄酸化物の結晶化を妨げるためであろう (Schwertmann *et al.*, 1968)。

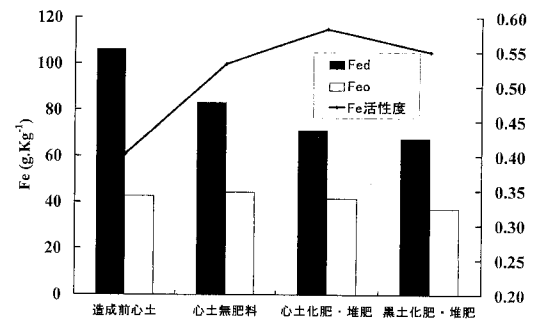


図-6 遊離酸化鉄, 非晶質酸化鉄の含量および酸化鉄の活性度

Fig. 6 Dithionite and acid oxalate extractable Fe, and Feo/Fed ratio of the soils

このように心土の造成後の熟畑化による大団粒(その多くは土塊)の減少は遊離酸化鉄含量の減少と一致しており, 安定な大団粒(土塊)の形成に遊離酸化鉄が接着剤として働いている可能性が示された。一方, 有機物は心土の大団粒の形成にはあまり関係がないようにみえる。

風乾土から水中篩別で得られた各粒径団粒の遊離酸化鉄含量と炭素を調べた(図-7, 図-8)。その結果, 接着剤

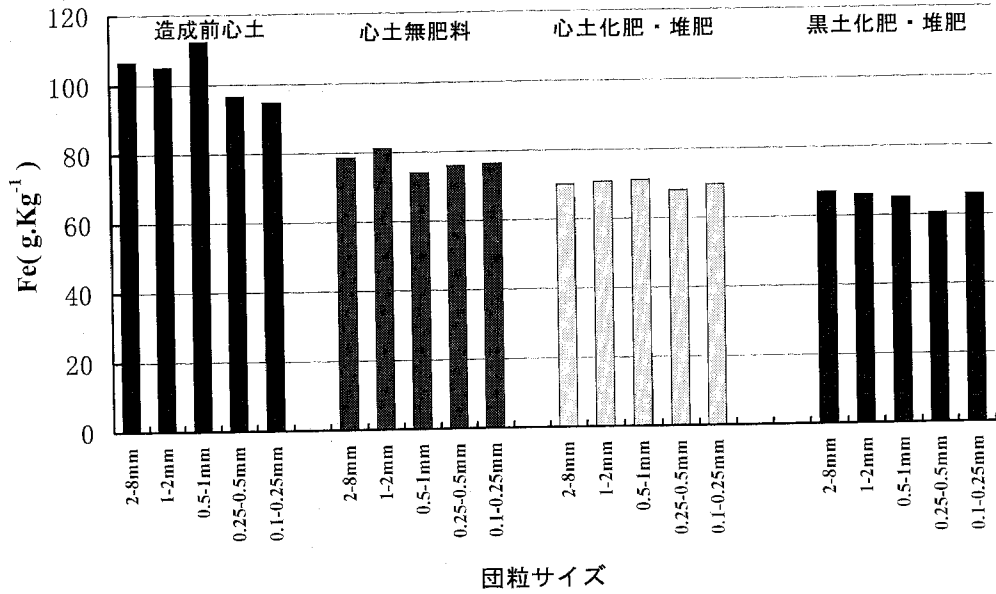


図-7 各土壌の各粒径団粒における遊離酸化鉄含量 (風乾土による水中ふるい分け)

Fig. 7 Content of Dithionite extractable Fe for aggregates of different size fractions

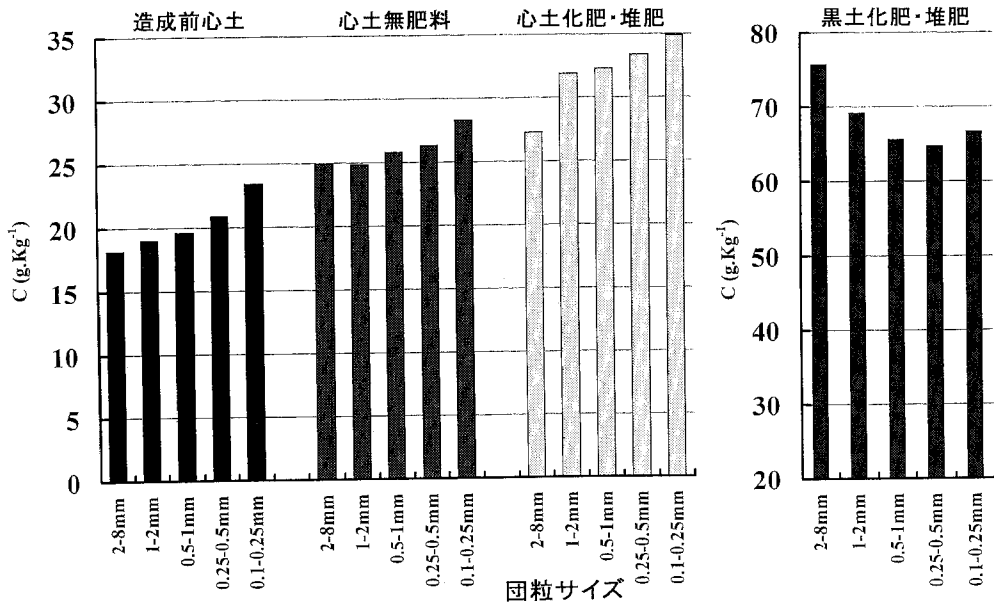


図-8 各粒径団粒の炭素含量

Fig. 8 Content of organic C for aggregates of different size fractions

としての酸化鉄の役割がより明瞭となった。造成前心土では大団粒のほうが小団粒より遊離酸化鉄の含量が多いのに対して、造成後の心土および黒色表土では大小団粒間の差異はみられない。このことは造成前心土において安定な大団粒(土塊)を形成するためにはより多くの酸化鉄の関与を必要とするが、造成後心土では安定な大団

粒の形成には酸化鉄はそれほど重要ではないようにみえる。一方、炭素量は造成前後の心土に小団粒ほど多く、有機物は小団粒の形成により重要だと考えられる。

図-9では脱鉄処理の結果を示した。造成前心土団粒の平均重量直径は対照の硫酸ナトリウム処理と蒸留水処理

表-2 抽出液中の鉄の濃度 (ppm)

試料	蒸留水 (pH 5.5)	0.4 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pH 5.3)	0.4 M Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (pH 5.8)
造成前心土	sd	sd	356.0
心土無肥料	sd	sd	872.7
心土化肥・堆肥	sd	sd	673.4
黒土化肥・堆肥	sd	sd	861.8

sd：痕跡

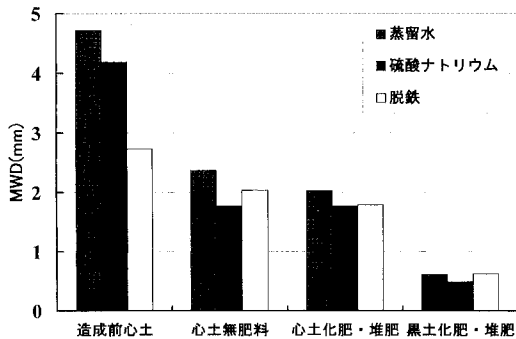


図-9 脱鉄処理後の団粒の平均重量直径

Fig. 9 MWD of water-stable aggregates after defferation

に比べ、脱鉄処理によって著しく減少した。造成前心土の団粒の安定、特に大団粒（土塊）の安定には鉄酸化物の役割が非常に重要であることが確認できた。一方、造成前心土以外の土壌では、いずれも脱鉄処理によるジチオナイト抽出液中に鉄は多く溶解している（表-2）にもかかわらず、脱鉄処理と対照処理間で団粒平均重量直径にはほとんど差異がみられなかった。造成前心土以外の土壌では酸化鉄の接着剤としての役割は小さいと考えられる。

総合考察

造成前心土では遊離酸化鉄が大団粒（土塊）を安定化する主な接着剤であると考えられるとともに、この大団粒は風乾処理（沸化）、振とう処理に対しても強い抵抗性を示すことから酸化鉄を接着剤とする結合力は強いと考えられる。一方、造成後心土では耕耘碎土作業によって心土が本来保持していた大団粒（土塊）が機械的に崩壊し、熟畑化の中で新たな団粒化が進んでいると考えられる。しかし、脱鉄処理などの実験からわかるように、熟畑化で再生した団粒では接着剤物質としての鉄酸化物の役割は小さい。一方、風乾処理でみられた造成後心土団粒の細粒化傾向は造成後有機物の増加と符号し、さらに小団粒により多くの有機物が含まれることを併せて考

えると、熟畑化による有機物の増加は小団粒の増加につながると考えられる。したがって、有機物の集積は造成後心土の団粒化にとって重要だと言えよう。

心土の熟畑化に伴う団粒構造の発達には微細孔隙の減少、粗大孔隙の増加につながり、熟畑化の一環として土壌構造の改善が実現されていると考えられる。調査した田無農場の作物収量データによると、造成後の心土区は十分量の施肥があれば、黒色表土と同程度の作物収量があった（山岸・松崎, 1997）。造成後心土は熟畑化により黒色表土の団粒構造に近似するような変化が進み、収量を保証したと考えられる。

4. まとめ

水中篩別を強さの異なる前処理と併せて行う団粒分析により、造成後の心土の構造変化をより明瞭に把握することができた。造成前心土は緩やかな生土処理と比較的強い風乾処理（沸化）において団粒の安定性はほとんど変わらないが、造成後心土は前処理の破壊強度の増加によって、大団粒は徐々に小団粒に分離したことが認められた。これらのことは造成前心土は団粒構造の発達が弱く、造成後の心土は発達した団粒構造を有すると判断できた。造成後の熟畑化により、土壌遊離酸化鉄の含量は減少した。脱鉄処理などの分析結果から造成前心土大団粒の安定には酸化鉄が重要であり、造成後心土の団粒の安定には酸化鉄はそれほど重要ではないことがわかった。一方、熟畑化は有機物を増加すると同時に有機物により多く含まれる小団粒の分布を拡大した。心土における小団粒の形成には有機物が関与することが示唆された。造成後の熟畑化によって粗大孔隙が増え、微細孔隙が減少した。このように、心土の構造は造成前の鉄酸化物によって接着された土塊から、熟畑化により有機物が関与する団粒構造に改善されたと言えよう。

謝 辞

土壌水分特性曲線の作成に際して東京農工大学農学部 加藤 誠助教授にご指導いただいた。感謝申上げる。

## 引用文献

- 土壌標準分析・測定法委員会 (1986) : 土壌標準分析・測定法, p. 77, 博友社, 東京.
- 古畑 哲・林 成周 (1980) : 土壌構造と孔隙組成との相互関係—十勝地方の火山性土の例—, 北海道農業試験場研究報告, **126** : 53~67.
- Kay B.D (1990) : Rate of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science*, **12**, p. 1-52, Springer-Verlag Inc., New York.
- Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. (1986) : Aggregate stability and size distribution. In *Methods of soil analysis, part 1, 2nd ed.*, Ed. A. Klute, p. 425~441 *Agron. Monogr.*, **9**, ASA and SSSA, Madison, Wisconsin.
- 丸茂義輝 (1992) : 点滴—蛍光 X 線分析法の土壌抽出液への応用, 土壌構成成分分析法, p. 71~100. 博友社, 東京.
- Oades, J.M. and Water, A.G. (1991) : Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.*, **29** : 815~828.
- Reeuwijk Van L.P. (1993) : Extractable iron, aluminum, manganese and silicon. *Procedures for Soil Analysis. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen*, 12~1, 12~2.
- Schwertmann, U., Fischer, W.R. and Papendorf, H. (1968) : The influence of organic compounds on the formation of iron oxide. *Trans. 9th Int. Cong. Soil Sci.* **1**, p. 645~655.
- Soil Survey Division Staff (1993) : *Soil Survey Manual*, USDA Handbook No. 18, p. 158 Washington, DC 20402.
- Tisdall, J.M. and Oades, J.M. (1982) : Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, **33** : 141~163.
- 山岸順子・松崎昭夫 (1997) : 瘠薄心土による造成畑の肥沃化過程—17年間における収量の推移, 日本作物学会記事, **66** 巻, 別2号, p. 65~66.
- Yoder, R.E. (1936) : A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.*, **28**, p. 337~351.

受稿年月日 : 1997年9月9日  
受理年月日 : 1998年2月12日