

## 土壌の団粒形成に及ぼす作物根の影響

小林 裕 志\*

Role of Plant Roots in Formation of Soil Aggregates

Hiroshi KOBAYASHI

Grassland Research Laboratory, Kitasato University

### はじめに

団粒という術語は aggregates の訳語として用いられている。RUSSELL は彼の著書の中で aggregates について以下のように整理している<sup>34)</sup>。土粒子の集合体は5  $\mu\text{m}$  級の微小なものから1 cm級以上の粗大なものまで実に多様である。微小なものから順に, domains → granules → crumbs → clods と呼ぶ。このうち crumbs ならびに clods の二つを指して aggregates と総称する。clods は通常の耕うん作業で crumbs へと破碎されるものである。crumbs のサイズは0.5~5 mm, clods は1 cm以上と類別できる。

一方, レポートの著書によれば<sup>28)</sup>, ソ連の農業物理学では0.25mmのサイズを境界として, これ以上の集合体は粗団粒, 以下は微細団粒と称し, 農業上の議論をする際はもっぱら前者の団粒を対象としている。

このように団粒は土粒子の集合体であるために, そのサイズが団粒を規定する際の重要な因子となっているようである。むしろ, サイズに留意するあまり団粒の形成過程にとらわれることなく, 現場から採取した土塊でも実験室でこね返してつくった土塊でも, すべて何ミリサイズの団粒という表現で扱われている。そこでは土壌を幾何学的な構造体とみて, 素材である土粒子の配列様式がつくり出す様々な物理的特性を攻究することが主目的なのであろう。

ところが前述の RUSSELL やレポートがいうところの団粒はもう少し実質的な意味に限定されている。すなわち, 作物の健全な生育を保証するための土壌条件として団粒構造の重要性を説いているのであって, それは crumbs や粗団粒に限られてくる。

これらの団粒は根系発達に何故有効なのか? これを攻究することが, 畑地や草地を農業の柱とする国における土壌科学の歴史であったように筆者は理解している。

### 団粒形成に關与する要因

作物生育と土壌の物理性に関する研究は畑地・草地農

業の国々では少なくない。たとえば, TAYLOR の根の発達と土壌強度・土壌構造などに関する綜説<sup>38,39)</sup>, EAVIS ら<sup>4)</sup>, GREACEN ら<sup>8)</sup> による根系発達を阻害する土壌の物理的因子に関する綜説, そして団粒構造に関する RUSSELL<sup>33)</sup>, HARRIS ら<sup>13)</sup>, ALLISON<sup>1)</sup>, などの綜説がある。いずれも多くの研究成果を引用紹介しており世界のレベルを知る上で有用である。わが国では, 1979年に土壌物理研究会の手によって, 植物生育と土壌の物理性に関する研究成果が集約されている<sup>44)</sup>。

これら多くの業績の中から団粒形成に關係ある成果を要約すると以下ようになる。

団粒の形成に關与する主な因子には, 植物根ならびに土壌動物の働りさがある。まず, 根の作用については図-1の概念が主流である<sup>42)</sup>。根は腐敗・分解して糊のよ

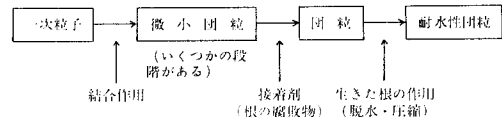


図-1 根による団粒の形成

うな役割で微小団粒を結びつけながら, さらに生きた根が土壌間隙をのびてゆき土粒子を押しつけたり, 水を吸収して団粒を乾かしたりして耐水性の団粒へと発達させるという理解である。レポートは根の『クサビ作用』という表現で, 根は土中のあらゆる方向へアミ目のようにはいめぐるって未分割の土壌を数 mm~0.5mm 級の団粒構造に細分化してゆくことを説いている<sup>28)</sup>。また根の間接的な作用としては, 根からの分泌物が土壌微生物を根の周辺にひきつけ, 微生物活動を促すことによって土壌の団粒化に役立っていることも指摘されている<sup>31)</sup>。この土壌微生物も含めて, ミミズなど土壌動物の働りさが団粒形成の主要な因子になることは古くから認識されている<sup>40)</sup>。むしろ根の作用に関する研究より多くの知見が発表されている。

ところで, 草地土壌が一般畑地土壌より耐水性の団粒

\* 北里大学獣医畜産学部

に富むことはよく知られた事実である。その理由は、牧草という密生作物を永年的に栽培する結果、きわめて豊富な根が存在し、その根が直接・間接的に土壌へいろいろな影響をもたらすからである。具体的には、①ルートマットは雨滴の衝撃から地表面を保護する、②膨大な量の繊維根群は土壌を緊縛化する、③膨大な量の根毛はその周辺土壌間隙の水分を吸収し、局部的乾燥状態をつくる、④古くなった根群は連続的に有機物供給源となる、⑤豊富な有機物は根圏微生物の生活環境を保証する、等の効果がある。

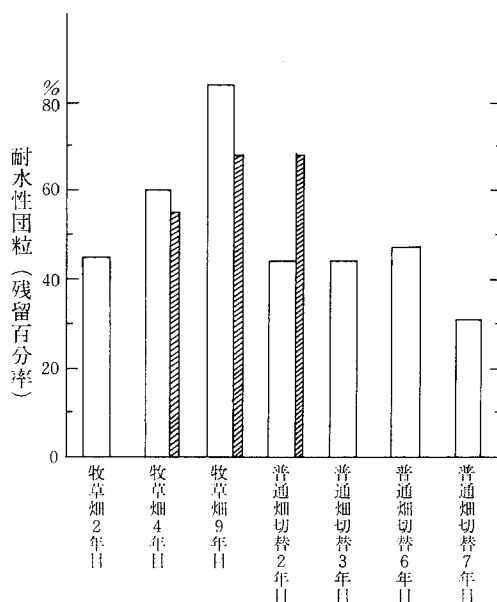
### 牧草根系の発達と耐水性団粒

#### 1 永年草地の団粒

牧草の根は畑作物の根よりはるかに多い(表一)<sup>41)</sup>。その経年的な変化をみると、0~10cmの地表付近における根量の増加が特にいちじるしい(表二)<sup>20)</sup>。これらの結果は黒ボク土壌で得られたものであるが、それ以外の土壌においても牧草根群は地表付近に集中分布する<sup>20)</sup>。これは、牧草自身の生理生態的な特質に加えて、土壌環境が下層土より良好であるからと説明されている。

さて、団粒に関しては YODER の水中篩別法で評価する耐水性団粒という表現が普通であるが、この耐水性団粒についていくつかの例をみてみよう。図一は黒ボク土壌における作付体系による消長であるが、牧草栽培による団粒増加がよくあらわれている<sup>17)</sup>。また図一三は永

年草地・畑地・林地・かん木地における比較であるが、草地の団粒量は未墾地である林地のみであった<sup>24)</sup>。また洪積土壌においても0~10cmの地表付近での間隙量増加が認められ(表一三)<sup>10)</sup>、牧草栽培により団粒構造が発達したことを示している。



図一 牧草栽培と1mm以上の耐水性団粒の消長 (0~10cm, 但し斜線は10~20cm)

表一 牧草類ならびに畑作物の根量 (乾物重kg/10a)

| 深 さ    | オーチャードグラス | ラジノクロバ | イタリアンライグラス | 陸 稻 | 大 豆 | 小 麦 |
|--------|-----------|--------|------------|-----|-----|-----|
| 0~10cm | 653       | 311    | 427        | }   | }   | }   |
| ~20    | 40        | 40     | 204        |     |     |     |
| ~30    | 18        | —      | —          |     |     |     |
| ~45    | —         | —      | —          |     |     |     |
| 合 計    | 712       | 351    | 631        | 155 | 44  | 140 |

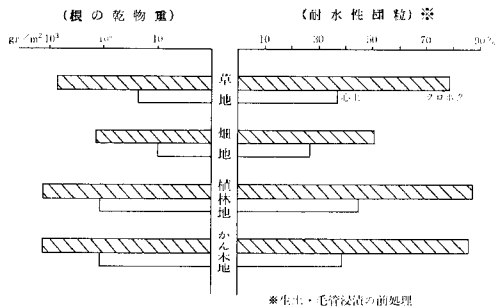
表二 牧草根群分布の経時変化 (乾物重g/m<sup>2</sup>)

| 深 さ     | 播種後の月令         |                |                | 永年草地           |
|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|         | 5              | 13             | 17             |                |
| 0~10 cm | 156.4 (32.0) % | 450.4 (64.1) % | 545.7 (65.1) % | 920.0 (79.2) % |
| ~20     | 152.4 (31.2)   | 134.0 (19.1)   | 156.0 (18.6)   | 126.8 (10.9)   |
| ~30     | 116.4 (23.8)   | 57.6 ( 8.2)    | 70.2 ( 8.4)    | 75.2 ( 6.5)    |
| ~40     | 38.0 ( 7.8)    | 32.0 ( 4.6)    | 42.9 ( 5.1)    | 24.8 ( 2.1)    |
| ~50     | 26.0 ( 5.2)    | 28.8 ( 4.0)    | 23.4 ( 2.8)    | 14.8 ( 1.3)    |
| 合 計     | 489.2 (100.0)  | 702.8 (100.0)  | 838.2 (100.0)  | 1,161.6(100.0) |

表一3 土壌の腐植と間隙に及ぼす牧草の影響

|           | 深さ(cm) | 全 C(%) | 腐植(%) | 全間隙(%) | 粗間隙  | 毛管間隙 | 透水係数*1               |
|-----------|--------|--------|-------|--------|------|------|----------------------|
| サツマイモ・小麦区 | 0~10   | 2.60   | 4.46  | 64.5   | 31.7 | 32.8 | $8.3 \times 10^{-3}$ |
|           | 20~30  | 1.32   | 2.26  | 62.5   | 24.3 | 38.2 | $5.5 \times 10^{-3}$ |
|           | 40~50  | 0.62   | 1.06  | 58.8   | 17.2 | 41.6 | $1.1 \times 10^{-3}$ |
| 牧草区*2     | 0~10   | 3.11   | 5.37  | 72.3   | 38.7 | 33.6 | $1.3 \times 10^{-2}$ |
|           | 20~30  | 1.49   | 2.56  | 65.3   | 25.9 | 39.4 | $7.6 \times 10^{-3}$ |
|           | 40~50  | 0.67   | 1.02  | 61.1   | 20.0 | 41.0 | $1.6 \times 10^{-3}$ |

\*1 cm/sec. \*2 イタリアンライグラス, オーチャードグラス, ラジノクローバ混播(2年間)



図一3 地被植生別にみた土壌団粒および根量

2 耕起土壌の団粒

1.5×1.5×0.5(深)mの試験枠の中へ10mmメッシュを通過した黒ボクを静かにつめて、イネ科牧草と陸稲を3年間栽培し、各々の根系発達が膨軟な作土層の土壌構造をどのように変化させるのか検討した<sup>21)</sup>。サイズが1mm以上の団粒量は経年的に増加し、レポートの団粒係数K値も大きくなっており(表一4)、土壌構造が根群生育に適する方向に変化していることが認められる。但し、供試土壌をあまりに膨軟にセットしたため、団粒量そのものは実際の黒ボク土壌より極端に低く、牧草と陸稲との差異は不詳である。そこで団粒構造のもうひとつの指標となる間隙性について検討をすすめると表一5、表一6になる。表一5は牧草区について播種当年と3年日との間隙量を比較したものである。全間隙量は5・15・35cmいずれの深さでも増加したが、1.5<pF<2.7のいわゆる有効間隙が増加したのは5cm深のみであった。一方表一6によれば、3年間耕起しない牧草区が全間隙量においては陸稲区より少ないけれども有効間隙は多い結果である。

この実験によれば、牧草の根系は、土壌が膨軟で無構造の状態では、根自身が周辺土壌を自らの生育に適する構造へと改造する能力をもつと考えられる。

イネ科牧草根の生育形態と土壌把握作用

団粒形成因子としての根は、第一に古い根の接着剤と

表一4 有効団粒(>1mm)および団粒係数の推移

単位%

| 測定時期<br>深さ cm | 1974年4月                  | 1975年10月  | 1976年10月                 |
|---------------|--------------------------|-----------|--------------------------|
|               | 0~10                     | 7.1(1.60) | 15.8(2.84)<br>16.4(2.39) |
| 10~20         | 24.2(4.12)<br>15.3(2.29) |           | 28.5(4.43)<br>22.0(3.23) |
| 20~30         | 20.5(3.79)<br>14.9(2.44) |           | 23.5(3.42)<br>25.1(3.57) |
| 30~50         | 19.1(4.24)<br>11.6(2.70) |           | 23.7(3.65)<br>21.6(3.55) |

(注)・各欄の上段は牧草区, 下段は陸稲区。

( )内は団粒係数K

・団粒分析は、生土を毛管飽和後に水中篩別

表一5 播種時に対する3年目の土壌間隙増減

(牧草区, %)

| 間隙区分<br>深さ | pF<1.5 | 1.5<pF<2.7 | pF>2.7 | 全間隙   |
|------------|--------|------------|--------|-------|
|            | 5cm    | +2.97      | +2.74  | -0.60 |
| 15         | +5.64  | -0.57      | -3.24  | +1.83 |
| 35         | +5.44  | +0.16      | -0.95  | +4.65 |

表一6 陸稲区に対する牧草区の土壌間隙増減

(1976年, %)

| 間隙区分<br>深さ | pF<1.5 | 1.5<pF<2.7 | pF>2.7 | 全間隙   |
|------------|--------|------------|--------|-------|
|            | 5cm    | +2.59      | +2.02  | -4.55 |
| 15         | -0.63  | +1.57      | -5.59  | -4.65 |
| 35         | -1.23  | +0.88      | -7.16  | -7.51 |

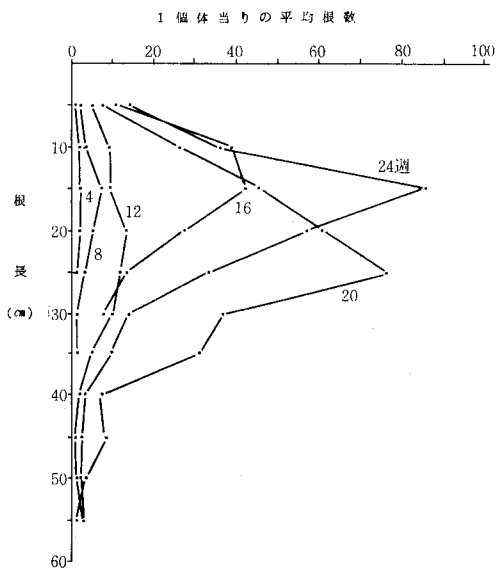


図-4-1 牧草の根長の分布  
〔イタリアンライグラスの週令別変化〕

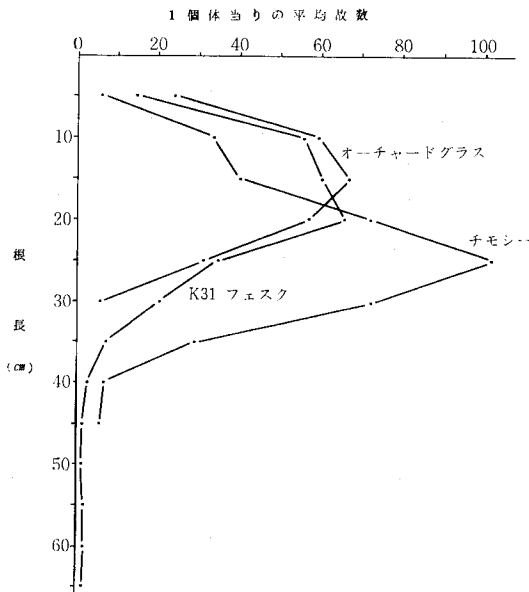


図-4-2 〔草種別にみた28週令での分布〕

しての役割、第二に生きた根の脱水圧縮作用、第三に生きた根のクサビ作用などがある (図-1 参照)。第一の作用は土壌微生物が仲介するものであるから、根の直接的な働きとしては第二・第三の生きた根 (以下、活性根と呼ぶ) の作用が大きい。

1 イネ科牧草活性根の根系

活性根の働きを検討するには、ガラス粒子や砂粒子などのモデル培地に植物を生育させる方法が有効である。古くはガラス管やガラスビーズを使った実験が報告されている<sup>2,49)</sup>。筆者は粒径を計測した微小ガラス粒や石英砂などを何種類か組みあわせて任意の間隙をつくり出しそこでの活性根の発達を追跡した。何種類かの供試草の成植物体の根系分布をを図-4 に示す<sup>20)</sup>。イネ科牧草は播種後8週令頃から主流根群グループを形成する。このグループの活性根は長さや太さにおいては生育令や草種での大きなちがいは認められず、根長15~25cm、根径400~600 $\mu$ mの範囲である。したがってイネ科牧草はその生理生態的特質として肥大成長や深さ方向への伸長をあまり期待できないことになる。そこで、主流根群を構成している活性根の本数増加をうながす土壌環境を与えることが、植物体の保定あるいは根周辺土壌の団粒形成には肝要となってくる。

2 イネ科牧草根の根群中の活性根

永年草地の根群中には老朽化した古い根もあれば活性根もある。生きた根の活性度を厳密に計測するのはなかなか面倒らしい<sup>37)</sup>。そこで筆者はJACQUESら<sup>19)</sup>に従って白い根を活性根として全根量との比較をおこなった<sup>21)</sup>。播種後3年間の活性根と老朽根の割合を図-5 に示す。

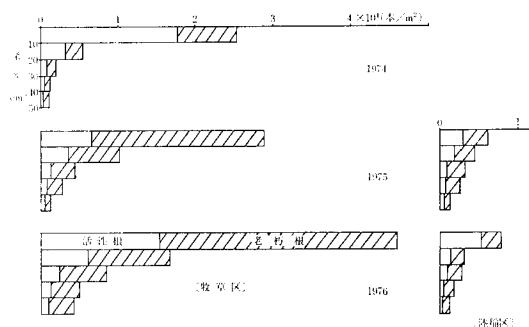


図-5 深さ別の活性根分布

播種当年は春に発生した多量の新根がはまだ老朽化するに至らず、高い活性根率を示している。2年目以降は前年の根がほとんど老朽化して全根量増加の原因となっているため新しく発生する根 (活性根) が老朽根を上まわることはない。そのために活性根の全根数に対する比率は0~10cm深で40%程度の低い値であるけれども、活性根の本数としてはかなり多量 (1.5 $\times$ 10<sup>4</sup>本/m<sup>2</sup>) である。ちなみに毎年春に耕うん作付した陸稲の場合、活性根の本数は (0.4 $\times$ 10<sup>4</sup>本/m<sup>2</sup>) であった。したがって永年根群に占める活性根の量は稲など一年性作物よりはるかに多く、永年草地においても土壌構造に与える活性根の影響割合は決して低くないことを示唆している。

3 活性根分泌物の粘着機能

活性根はその根圏へ糖類・アミノ酸・ビタミン類など種々の有機化合物を分泌している<sup>32)</sup>。根の根冠細胞やその後方の表皮細胞 (根毛) からは糖類のなかまともみられ

る粘液物質が分泌される。植物サイドからは、この粘液物質は物理的な土粒子とのマッサ抵抗をやわらげて根の伸長を助け、さらには植物の正常な生育に欠かすことのできない土壌微生物の栄養源であると考えられている<sup>27)</sup>。土壌のサイドでは、微生物の分野を除けば、この粘液物質はほとんど注目されていなかった。ところが筆者の実験によれば、モデル培地の活性根一本一本には無数の粒子が付着し、根を粒子の接点では粘液物質（組織化学的にペクチン様物質と推定）の存在が確認できたのである。このペクチン様物質は根が粒子間隙をはいめぐるときの潤滑剤の機能をもつのであるが、粒子間隙の水分がなくなって乾いてくると高い粘着強度をもたらすことも知れた<sup>19)</sup>。これら一連の実験結果は、活性根の分泌物が根周辺の土壌を粘着させて団粒へと発展させる可能性ありとの見解をもたらすことになった。

この概念を図-6で模式的に説明しよう。

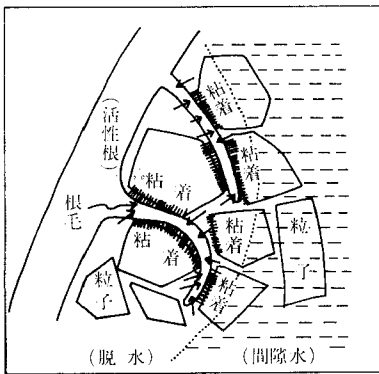


図-6 活性根による土粒子粘着概念図

土壌中に侵入した初生根は根の分泌するペクチン様物質によって周辺土粒子を粘着し、草体固定の第一歩をきざす。ついで活性根の根系拡大がすすむにつれ、ペクチン様物質の分泌量も急増し、粘着作用の影響範囲が拡大する。と同時に根毛を主とする活性根群の吸収作用により、土壌間隙水が局所的に脱水される<sup>28)</sup>。ここにおいて草地の根群域土壌の団粒化がうながされる。以上のことにより、筆者は活性根の分泌物による粘着作用も従来の生きた根の働きの中に加えた。

なお、粘着作用で形成された団粒が水に対して安定性を維持するためには、これまで多くの指摘があるように、土壌微生物の作用、ミミズなど土壌動物の作用、肥培管理など人為的作用などいろいろな影響を受けなければならない。

### 団粒形成因子としての多糖類の評価

活性根周辺での存在が確認されたペクチン様物質はウ

ロン酸の構成物質のひとつである。したがって、団粒中のウロン酸やその他の多糖類を攻撃することは、団粒形成因子としての活性根の評価をもう一步すすめることになる。多糖類物質の膠質機能については有機物の微生物分解にともなう中間産物として、これまでも検討されてきた<sup>12,29)</sup>。

さて、図-1の中で微小団粒→団粒の過程においては、土粒子の結合物質（安定化物質）の存在が重要視されている<sup>35)</sup>。この結合物質としては上述の多糖類物質の他、粘土と有機物のコロイド物質が膠質材として働くこと<sup>4,7)</sup>、有機物と土粒子の結合には鉄やアルミナの水酸化物がその仲介に重要であること<sup>36)</sup>、など多くの論議がある。

本論のテーマである作物根群の作用に限定して考えてみると、生物物理的には根群のクサビ作用・吸水作用などが指摘できるし、化学的には老朽根・枯死根などの易分解性腐植ならびに炭水化物（多糖類）を主たる構成物とする非腐植物質があげられる。非腐植物質の起源は土壌微生物が中心と理解されてきた<sup>11)</sup>。このような背景の中で植物に由来する多糖類の消長について触れておきたい。

### 1 牧草根の発達と多糖類分泌

一般畑作物の活性根を対象に、その分泌物を扱った例がいくつかある<sup>14,32)</sup>。これらの研究はあくまでも分泌物を土壌微生物の栄養源とみなしての展開である。牧草類を対象に多糖類分泌を検討した例がほとんどなかったため、筆者は5草種を供試して水耕培地で実験をおこなった。その結果、牧草類が分泌する多糖類（この場合はグルコースおよびウロン酸を定量）は麦類などにくらべかなり低い量であることが明らかになった<sup>25)</sup>。さらに実際土壌に近似したモデル粒子培地での分泌量は水耕培地のそれより明らかに多い結果を得た<sup>26)</sup>。AYERSら<sup>3)</sup>、CLAYTONら<sup>5)</sup>の報告では、粒子培地での根は表層が傷つき、そこからの体液流出が真の分泌量に加わるからであると説明されている。筆者は、別途おこなった実験によってこれらの見解とちがった考え方をしている。すなわち、活性根は粒子という固形物に接触し刺激を受け、根の伸長により適した間隙を探し出す動きを示すのであるが<sup>22)</sup>、この物理的刺激が分泌量を多くしているとの考えである。とあれ、麦類よりは分泌量が少ないものの、実際土壌における牧草根量の豊富さ（表-1）を考慮すれば、牧草活性根の多糖類分泌はかなりの量となる。

### 2 耐水性団粒中の土壌多糖類

土壌中の多糖類が微生物に由来しても植物分泌物に由来したとしても、それが団粒形成に有効に働いているのであれば、耐水性団粒中には微小な小団粒中より多くの土壌多糖類を含むのではないだろうか。図-7は関東ロ

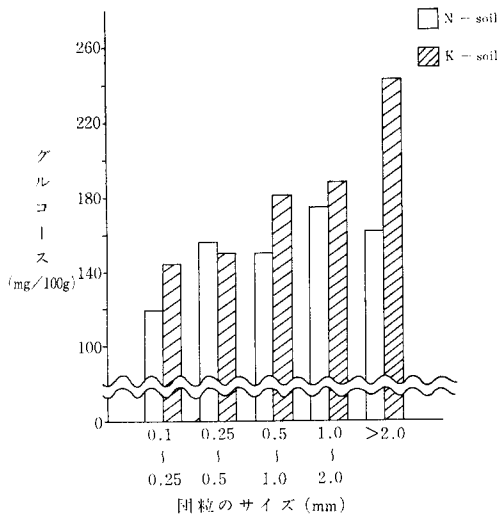


図-7-1 団粒径別にみたグルコースの含量

(N-soil: 東京農工大付属草地)  
(K-soil: 北里大付属草地)

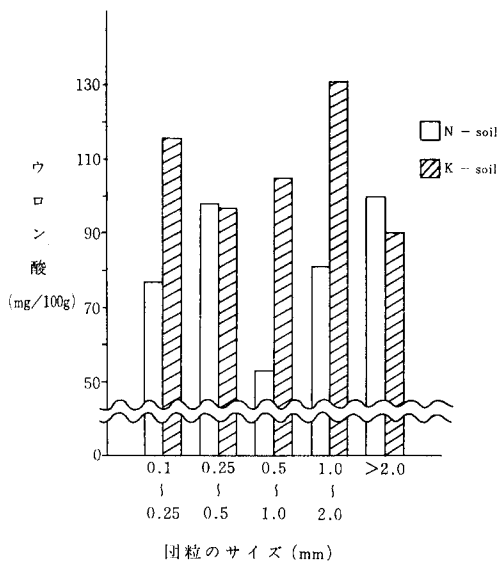


図-7-2 団粒径別にみたウロン酸の含量

ームの黒ボクと十和田火山灰の黒ボクを供試して、団粒のサイズ別にグルコースおよびウロン酸の存在を試験したものである<sup>13)</sup>。両土壌とも牧草栽培していたのであるが、グルコースについては粒径の大きな耐水性団粒中に小さな団粒より多くの含量が認められた。植物分泌物の指標として定量したウロン酸については明確な傾向は認められなかった。グルコースは土壤多糖類のなかまでは広く多量に分布しているが、ウロン酸ははるかに微量である。このためウロン酸の消長を把握することは精密な分析技術を要する。それでも、土壤多糖類の起源が微生

物に求められがち傾向の中で、植物との関連で追求するためにはウロン酸など活性根分泌物の挙動を明らかにするといった手法での展開が必要なのではないだろうか<sup>9),10)</sup>。

(謝辞)

本稿は農業土木学会土壤物理研究部会第16回シンポジウム(1977)での講演内容を骨子に、その後の実験結果なども含めて論述したものである。原稿の御校閲を頂いた、三重大学農学部長田昇教授に深甚の謝意を表します。また、ここに述べた実験のほとんどは、文部省科学研究費(課題番号、256175, 356179, 456205)の助成を受けておこなったことを付記する。

引用文献

- Allison, F.E. (1968): Soil aggregation—Some facts and fallacies as seen by a microbiologist. *Soil Sci.* 106, 136-143.
- Aubertin, G.M. and Kardos, L.T. (1965): Root growth through porous media under controlled conditions (I). *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29, 290-293.
- Ayers, W.A. and Thornton, R.M. (1968): Exudation of amino acids by intact plants and damaged roots of wheat and pea. *Plant and Soil* 28, 193-207.
- Baver, R.D. (1956): *Soil physics* 3rd Ed. pp. 135-139. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Clayton, M.F. and Lambertson, J.A. (1964): A study of root exudates by the fog-box technique. *Australian J. Biol. Sci.* 17, 855-866.
- Eavis, B.W. and Payne, D. (1969): Soil physical conditions and root growth. (W.J. Whittington, Ed., *Root growth*, pp. 315-318), Butterworths, London.
- 江川友治・関谷宏三・佐藤昭夫・飯村康二 (1957): 多年性牧草導入による土壤理化学性の改良, *農技研報* B7, 53-79.
- Greacen, E.L., Barley, K.P. and Farrell, D.A. (1969): The mechanics of root growth in soils with particular reference to the implications for root distribution. (W.J. Whittington, Ed., *Root growth*, pp. 256-269) Butterworths, London.
- Greenland, D.J., Lindstrom, G.R. and Quirk, J.P. (1961): Role of polysaccharides in stabilization of natural soil aggregate. *Nature* 191, 1283-1284.
- Gupta, U.C. and Sowden, F.J. (1967): Isolation and characterization of cellulose from soil organic matter. *Soil Sci.* 97, 328-333.
- 浜田竜之助 (1972): 土壤の多糖類について, (土肥学会編, 近代農業における土壤肥料の研究, 第3集, pp. 44-49) 養賢堂, 東京.
- Harris, R.F. (1963): Evaluation of microbial activity in soil aggregate stabilization and degradation by the use of artificial aggregates. *Soil Sci. Soc. Ame. Proc.* 27, 542-545.
- Harris, R.F., Chesters, G. and Allen, O.N. (1966): Dynamics of soil aggregation. *Advan. Agron.* 18, 107-169.
- 平田 照 (1976): 植物の養水分吸収, (高井・早瀬・熊沢編, 植物栄養土壤肥料大事典, pp. 140-150) 養賢堂, 東京.

- 15) Jacques, W. A. and Sghwass, R. H. (1956) : Root development in some common New Zealand pasture plants (VII). N. Z. J. Sci. Tech. A38, 569-583.
- 16) 加藤敏雄・近藤鳴雄・鈴木俊彦(1954) : 浜名湖周辺洪積層土壌に対する地力保全対策, 静岡農試研報9, 52-61.
- 17) 北岸確三 (1962) : 火山灰土壌における牧草集約栽培に関する土壌肥料的な研究, 東北農試研報23, 1-67.
- 18) 小林裕志・山根一郎 (1976) : 草地土壌の耐水性団粒の形成と土壌多糖類, 日草誌22, 196-200.
- 19) 小林裕志 (1976) : 牧草根の土壌把握作用, 土壌の物理性34, 2-7.
- 20) 小林裕志 (1977) : イネ科牧草根の物理的な機能に関する研究(I), 日草誌23, 135-139.
- 21) 小林裕志・大竹良明 (1977) : 同上(III), 日草誌23, 235-240.
- 22) 小林裕志・大竹良明 (1977) : 同上(IV), 日草誌23, 241-246.
- 23) 小林裕志 (1977) : 草地の上層水分移動に及ぼす牧草根群の影響, 農土誌45, 155-158.
- 24) 小林裕志 (1979) : 火山灰質土壌の団粒形成に及ぼす作物根の影響, 農土誌47, 59-60.
- 25) 小林裕志・鈴木昇 (1979) : 牧草根の発達と多糖類分泌に関する研究(I), 日草誌25, 222-226.
- 26) 小林裕志・鈴木昇 (1979) : 同上(II), 日草誌25, 227-230.
- 27) 熊沢喜久雄・西沢直子 (1976) : 植物の養分吸収, pp. 16, 東大出版会, 東京.
- 28) レポート原著・松田宏訳 (1968) : 土壌物理, pp. 21-74, 農林水産技術会議.
- 29) Martin, J. P. (1971) : Decomposition and binding action of polysaccharides in soil. Soil-Biol. Biochem. 3, 33-41.
- 30) 大崎玄佐雄・奥村純一・関口久雄 (1975) : 根圏土壌の理化学性が牧草生育に及ぼす影響第2報, 道農試集報32, 35-44.
- 31) Rovira, A. D. (1962) : Plant-root exudates in relation to the rhizosphere microflora. Soils and Fertilizers, 25, 167-172.
- 32) Rovira, A. D. and McDougall, B. M. (1967) : Factors responsible for the rhizosphere effect. Soil Biochemistry, 1, 433-440.
- 33) Russell, E. W. (1971) : Soil structure. J. Soil Sci. 22, 137-151.
- 34) Russell, E. W. (1973) : Soil conditions and plant growth, 10th Ed., pp. 479-554, Longman, London.
- 35) 斎藤万之助 (1976) : 土壌団粒 (高井・早瀬・熊沢編, 植物栄養土壌肥料大事典, pp. 374-377) 養賢堂, 東京.
- 36) 佐藤 孜・山根一郎 (1972) : 有機無機複合体の粒径分画法による分離土壌中の有機無機複合体の分離とその性状(I), 土肥誌43, 41-46.
- 37) 田中典幸 (1974) : 作物の根に関する研究, 日作紀43, 291-316.
- 38) Taylor, H. M., Huck, M. G. and Klepper, B. (1972) : Root development in relation to soil physical conditions. (D. Hillel, Ed. Optimizing the soil physical environment toward greater crop yields, pp. 57-77) Academic Press, New York.
- 39) Talor, H. M. (1974) : Root behavior as affected by soil structure and strength. (E. W. Carson, Ed. The plant root and its environment, pp. 271-291) The Univ. Press of Virginia, Virginia.
- 40) 都留信也 (1971) : 土と生態 pp. 59-95, 共立出版, 東京.
- 41) 山根一郎 (1963) : 土壌と草生(6), 畜産の研究17, 881-884.
- 42) 山根一郎 (1971) : 土壌学の基礎と応用, pp. 83-84, 農文協, 東京.
- 43) Wiersum, L. K. (1957) : The relationship of the size and structure rigidity of pores to their penetration by roots, Plant and Soil 9, 75-84.
- 44) 土壌物理研究会 (1979) : 土壌の物理性と植物生育, 養賢堂, 東京.

[1980. 7. 5. 受稿]