

VII.1 地表面流出水中の土砂 (wash) 濃度の変化

Fig. VII-1~4は、ライシメータ実験における降雨中の地表面流出(runoff)中の土砂濃度の変化を示したものである。Fig. VII-1,2が山梨粘土ローム、3,4が国頭マージの結果を示している。

山梨粘土ロームでは、湿土の傾斜 $2.6, 11^{\circ}$ の結果と風乾土の傾斜 6° の結果が示してある。風乾土の場合は、1回目の降雨開始時が風乾で、2回目以降は、湿土と同じ経過、手順で実験を行った。

湿土の場合は、1回目の降雨の時の地表面流出水発生時に高い土砂濃度を示し、その後は土砂濃度が徐々に低下していった。2回目以降の降雨では、傾斜 11° の場合を除いて降雨の度に濃度が減少した。傾斜 11° の場合は、降雨の回数が増す毎に若干濃度が増えた。風乾土の場合は、1回目の降雨で、地表面流出発生直後に少し高い濃度を示した後にほぼ一定の濃度を示した。2回目の降雨では降雨全体を通して1回目の降雨よりも高い土砂濃度を示し、3,4回目の降雨では、土砂濃度が若干小さくなり1回目の降雨と同程度の値を示した。washの粒径組成 (Fig. VII-10(a)) では、湿土と風乾とでは、組成が異なった。湿土の場合は、降雨前の粒径組成にかなり近い構成であったが、風乾土の場合は、粒径 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ の細砂から砂分に相当する分が非常に多くなっている。平均wash濃度 (Fig. VII-5(a)) からみて、山梨粘土ロームの場合も、風乾土の団粒は壊れにくいものと考えられる。

国頭マージの場合は、湿土の $6, 11^{\circ}$ 、風乾土の 11° の結果が示してある。国頭マージの場合は、湿土は、山梨粘土ローム同様、地表面流出発生時に高い土砂濃度を示し、その後徐々に減少した。風乾土の場合は、1回目の降雨中には、特にピークはなかった。2回目の降雨では、地表面流出発生時(降雨開始直後)に1回目の降雨時の最大土砂濃度を超える土砂濃度を示した後に漸減した。3,4回目の降雨でも地表面流出発生時に若干高い土砂濃度を示した後に定常値へと漸近した。この定常値は、1回目の降雨終了直前の土砂濃度とほぼ同じである。washの粒径組成も、初期水分によらずほぼ一定であった (Fig. VII-10(b))。

山梨粘土ロームと国頭マージを比較すると、土砂濃度は、ピーク値、定常値と

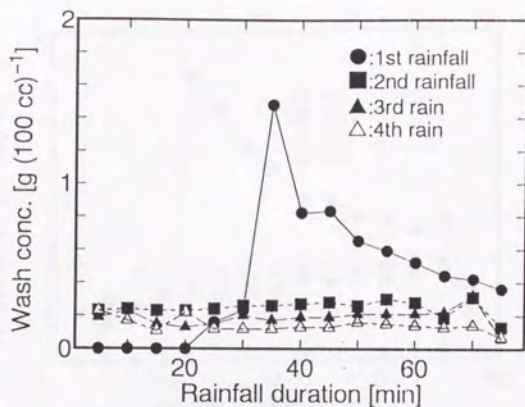


Fig. VII-1(a) Wash concentration of the runoff during a rainfall (Yamanashi 2.4° moist)

地表面流出水中の土砂濃度 (山梨粘土ローム、湿土、2.4° 斜面)

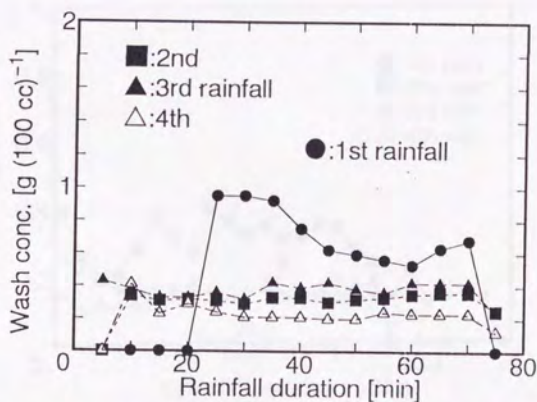


Fig. VII-1(b) Wash concentration of runoff during a rainfall (Yamanashi 6° moist)

地表面流出水中の土砂濃度 (山梨粘土ローム、湿土、6° 斜面)

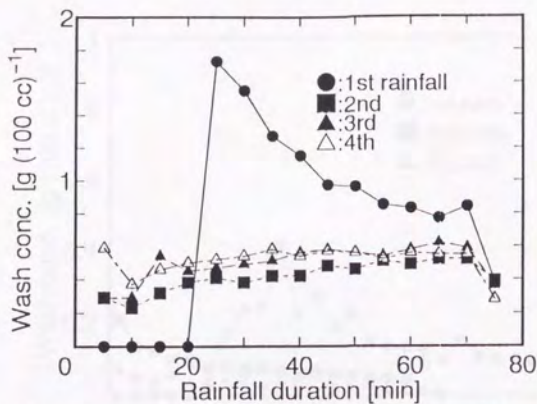


Fig. VII-1(c) Wash concentration of runoff during a rainfall (Yamanashi 11° moist)

地表面流出水中の土砂濃度 (山梨粘土ローム、湿土、11° 斜面)

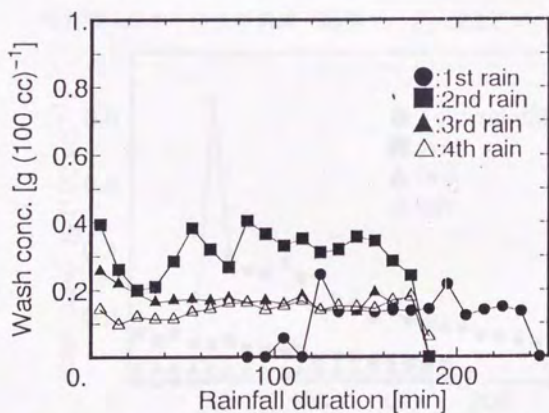


Fig. VII-2 Wash concentration of runoff during rainfall (Yamanashi airdry 6° slope)

地表面流出水中の土砂濃度 (山梨粘土ローム、風乾土、6° 斜面)

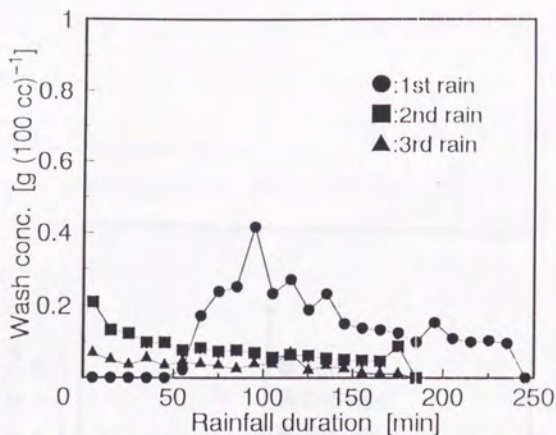


Fig. VII-3(a) Wash concentration of runoff during rainfall (Maji moist 6°)

地表面流出水中の土砂濃度 (国頭マージ、湿土、6° 斜面)

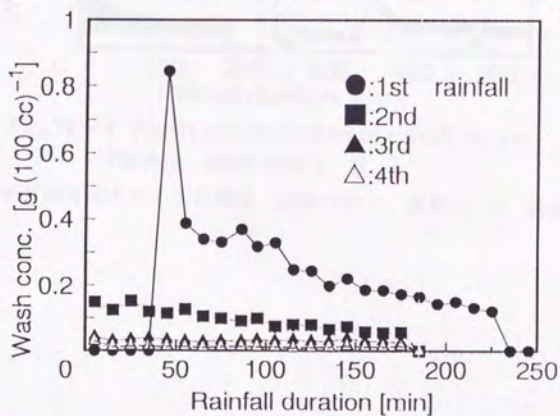


Fig. VII-3(b) Wash concentration of runoff during rainfall (Maji moist 11°)

地表面流出水中の土砂濃度 (国頭マージ、湿土、11° 斜面)

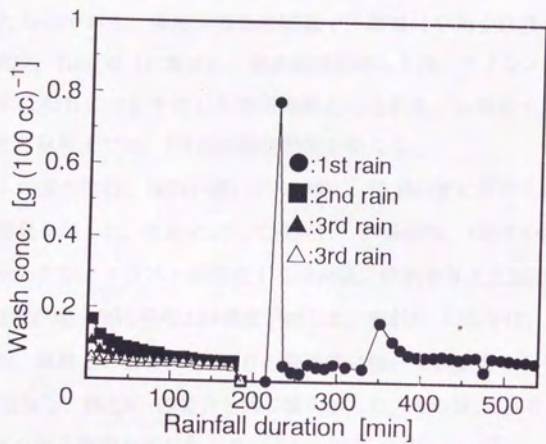


Fig. VII-4 Wash concentration of runoff during rainfall (Maji airdry 6°)

地表面流出水中の土砂濃度 (国頭マージ、風乾土、6° 斜面)

も山梨粘土ロームの方が約2倍大きな値を示した。クラストのでき易さという点から考えても供試土間の比較では、山梨粘土ロームの方が分散しやすい「弱い」団粒であったといえる。

Ⅶ.2 地表面流出の平均土砂濃度の変化

Fig.VII-5は、一降雨毎の平均土砂濃度で、地表面流出水中の全土砂量を積算地表面流出量で割ったものである。横軸が降雨の回数で、縦軸は平均土砂濃度である。各降雨の降雨時間は、Table VII-1に載せた。地表面流出若しくは、ライシメータ底部からの排水が定常になるまでを予定した降雨時間としたため、山梨粘土ロームと国頭マーヅ、湿土と風乾土では、1降雨の降雨時間が異なる。

山梨粘土ロームの湿土では、傾斜の緩い 2° の時に、降雨の度に平均土砂濃度が減少するという結果を示した。それに対して傾斜 11° の場合は、1回目の降雨で最大の土砂濃度を示したが、クラストが存在する地表面に降雨を与えた2回目以降の降雨では、降雨回数が増す毎に平均土砂濃度が増した。傾斜 6° の場合は、両者の中間の変化を示した。風乾土の場合は、1回目の降雨時に低い土砂濃度を示した後に2回目の降雨では増加し、湿土 6° の場合と同じ値を示した。その後、3回目以降の降雨では、土砂濃度が減る傾向を示した。

国頭マーヅでは、傾斜、初期水分に関わり無く降雨の度に地表面流出水中の土砂濃度が減少した。

また、いずれの供試土においても、傾斜が大きい方がwash濃度が高いという傾向が得られた。50cmという短い斜面長でもwash濃度の差が生じるということは、より長い斜面長のライシメータ（リルが形成するような2m以上のもの）や実際の圃場では、さらに大きな違いが生まれるものと考えられる。実際、土壌流亡が深刻な農業・環境問題となっている国頭マーヅでは、傾斜 $7\sim 8^\circ$ の斜面圃場において $1.5\sim 4\text{ g }100\text{cc}^{-1}$ 程度の浮遊土砂が流出することが野外調査の結果として報告されている（吉永、翁長 1993）。この値は、今回の実験結果の10倍近い値で、この大きな違いは、斜面長の差が大きい原因である（Bryan and Posen 1989）。

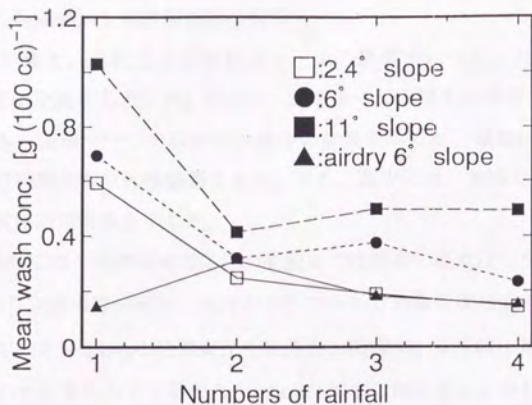


Fig. VII-5(a) Mean wash concentration of runoff from different slopes and initial water contents (Yamanashi)

地表面流出水中の平均土砂濃度 (山梨粘土ローム)

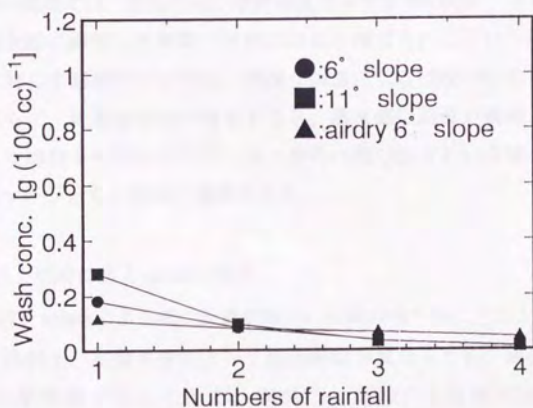


Fig. VII-5(b) Mean wash concentration in runoff from different slopes and initial water contents (Maji)

地表面流出水中の平均土砂濃度 (国頭マージ)

Ⅶ.3 ライシメータから飛散した土砂量 (splash)

Ⅶ.3.1 飛散土 (splash) と地表面流出の関係

国頭マージの湿土、風乾土と山梨粘土ロームの風乾土については、降雨中の splash の時間変化を測定した。Fig.Ⅶ-6は、国頭マージの湿土の場合、Fig.Ⅶ-7は、山梨粘土ロームと国頭マージの風乾土の場合の結果を示した。横軸は、降雨時間で縦軸は、単位時間当たりの飛散量である。また、図中には、矢印で1回目の降雨の際の地表面流出の発生時を示した。

1回目の降雨時には、地表面流出発生直前までは地表に湛水はなかった。それに対して、2回目以降の降雨時は、地表のクラストのため降雨開始直後から地表面に湛水が生じていた。splash の時間変化を見ると、国頭マージでは、地表面に浸透できない降水の水たまりができ始めると splash が増加し始めることがわかる。この傾向は、湿土、風乾土という初期水分の違いに依らないが、湿土の場合に特に顕著であった。一方、山梨粘土ロームでは、降雨開始から徐々に splash が増加し、地表面流出が発生以後は、ほぼ定常な splash を示した。

降雨実験中の観察では、降雨初期の地表面流出発生までの間に、山梨粘土ロームは、雨滴が地表面に衝突した衝撃で団粒がはじき飛ばされるという現象が多く観察されたのに対して国頭マージでは、同様な雨滴による団粒のはじき飛ばしは少なかった。さらに、地表面流出が発生すると、湛水部に雨滴が衝突した時の水の飛散とともに土壌粒子や団粒がライシメータ外へ飛び出すという様子が山梨粘土ローム、国頭マージともに頻繁に観察された。

Ⅶ.3.2 クラスト形成による splash の変化

Fig.Ⅶ-8には、splash による流亡土量が降雨の回数が増す毎にどのように変化するかを示した。供試土、初期水分によって降雨時間が異なるため、単位時間、単位面積当たりの平均値で示してある。横軸は、連続する降雨の回数、縦軸は、splash による流亡量である。土壌クラストは、1回目の降雨の途中で形成し、2回目以降の降雨では、降雨開始時からクラストが存在している。

山梨粘土ローム、国頭マージとも、傾斜、初期水分によらず降雨回数が増えるにつれて splash が減少する傾向を示した。特に、国頭マージでは、降雨回数が増す

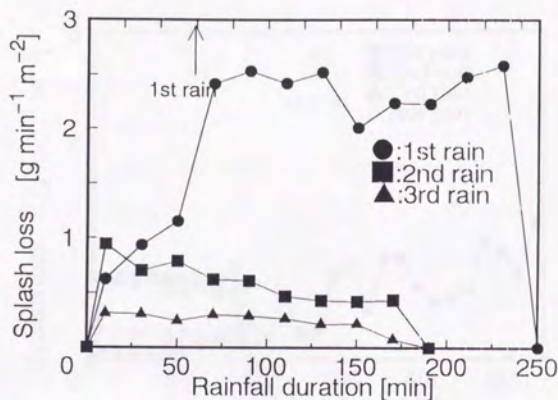


Fig. VII-6(a) Soil loss by splash during rainfall
(Maji moist 6°, axis: beginning of runoff event at 1st rain)
降雨中の飛散による流亡土量の時間変化 (国頭マージ、湿土、6° 斜面)

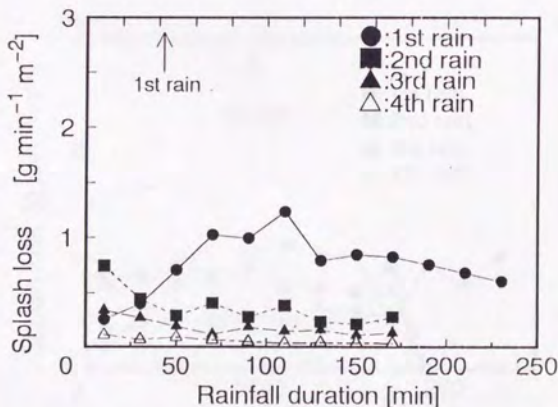


Fig. VII-6(b) Soil loss by splash during rainfall
(Maji moist 11°, axis: beginning of runoff event)
降雨中の飛散による流亡土量の時間変化 (国頭マージ、湿土、11° 斜面)

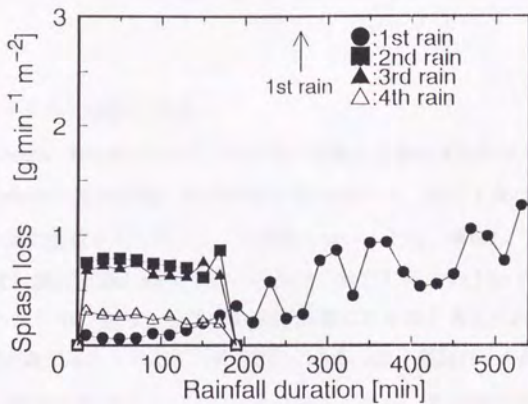


Fig. VII-7(a) Soil loss by splash during rainfall (Maji air dry 6°, axis: beginning of runoff event)

降雨中の飛散による流亡土量 (splash) の時間変化 (国頭マージ、風乾土)

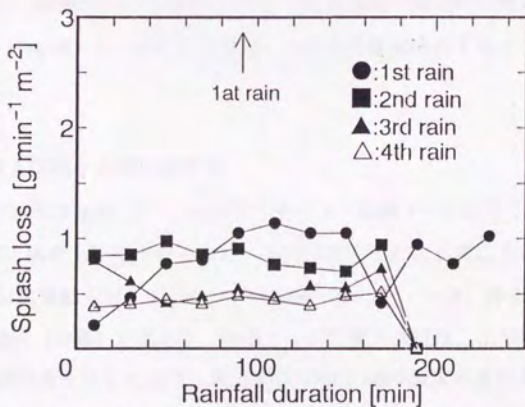


Fig. VII-7(b) Soil loss by splash during rainfall (Yamanashi air dry 6°, axis: beginning of runoff event)

降雨中の飛散による流亡土量 (splash) の時間変化 (山梨粘土ローム、風乾土)

につれて一定値に収束する傾向を示したが、山梨粘土ロームでは、4回の降雨まででは、特筆するような傾向はなかった。

両供試土とも風乾土は、降雨の回数が増してもsplashの量があまり変化しなかった。

Ⅶ.4 ライシメータからの全流亡土量

Fig.Ⅶ-9には、wash、splashを合わせた降雨毎の全流亡土量の変化を示した。ライシメータからのsplashの変化同様、降雨時間が様々なので、流亡土量は単位時間、単位面積当たりの流亡土量として示した。山梨粘土ロームでは、傾斜 2.4° 、 6° の斜面では、降雨の度に流亡土量が減少した。これは、流亡しやすい土粒子、団粒が侵食されてしまったため、残った土壌の耐食性が増したものと考えられる。一方、風乾土では、降雨回数が増しても流亡土量は変化しなかった。傾斜 11° の斜面では、1回目の降雨から2回目の降雨までに流亡土量が減少したが、その後は降雨回数が増すにつれて侵食量が増加した。

国頭マージの湿土では、降雨の度に流亡土量が減少したが、風乾土では、1回目の降雨よりも2回目の降雨の方が流亡土量が多く、3回目以降の降雨で流亡土量が減少した。これは、国頭マージの風乾土では、2回目以降の降雨時の地表面流出中の平均土砂濃度 (Fig.Ⅶ-5) が湿土の2回目、3回目の降雨時の平均土砂濃度よりも高いためである。

Ⅶ.5 地表面の貫入抵抗と土壌の耐食性

Fig.Ⅶ-1~3ならびにFig.Ⅶ-5で、山梨粘土ロームと国頭マージを同じ条件 (湿土 6° 、 11° ならびに風乾土) で比較すると、地表面流出中による流亡土量 (wash) は、国頭マージが山梨粘土ロームの $1/2 \sim 1/3$ の値を示した。一方、降雨1時間後のクラストの貫入抵抗 (Ⅳ章) を見ると、国頭マージの貫入抵抗は、山梨粘土ロームの値の2から2.5倍の値を示しており、貫入抵抗の値とwash濃度の変化を比較すると、土壌の硬度 (貫入抵抗) が増すことにより、地表面流出水中の土砂量がほぼ反比例して減少するという結果となった。ライシメータからのsplashに関しては、定性的には、地表面の貫入抵抗増大に対応してsplashが減少するという結果と

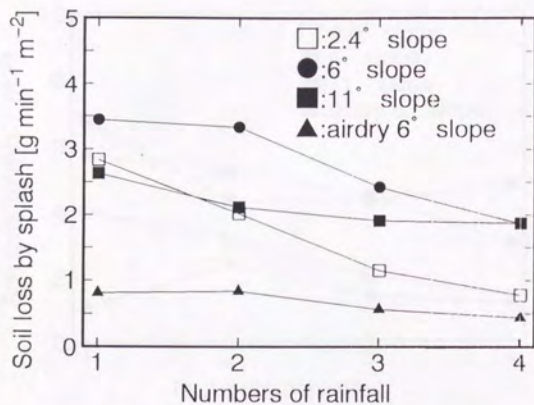


Fig. VII-8(a) Mean soil loss by splash during a rainfall (Yamanashi)

降雨中の平均飛散流亡土量 (山梨粘土ローム)

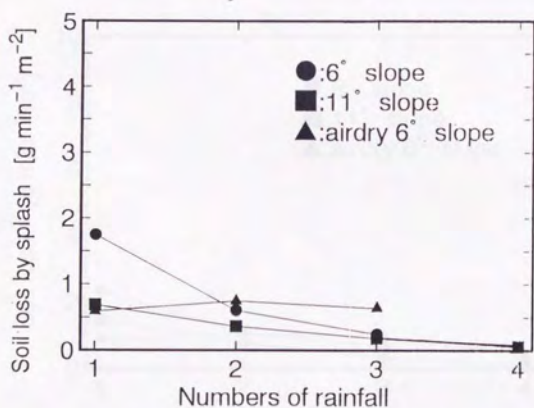


Fig. VII-8(b) Mean soil loss by splash during a rainfall (Maji)

降雨中の平均飛散流亡土量 (国頭マージ)

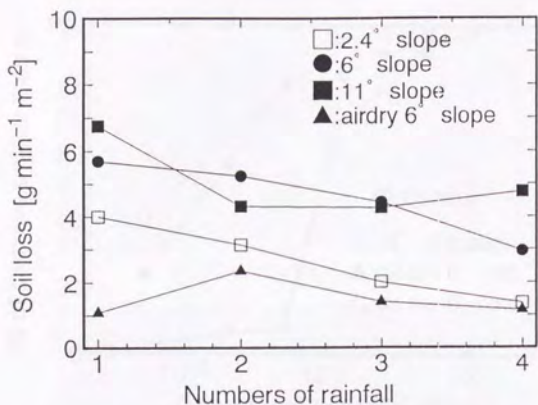


Fig. VII-9(a) Effects of slope and initial water contents on soil loss during a rainfall (Yamanashi)

降雨中の平均土壌流亡速度と傾斜、初期水分の関係（山梨粘土ローム）

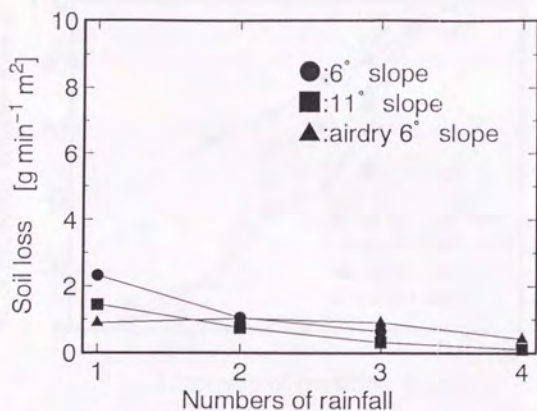


Fig. VII-9(b) Effects on slope and initial water contents on soil loss during a rainfall (Maji)

降雨中の平均土壌流亡速度と傾斜、初期水分の関係（国頭マージ）

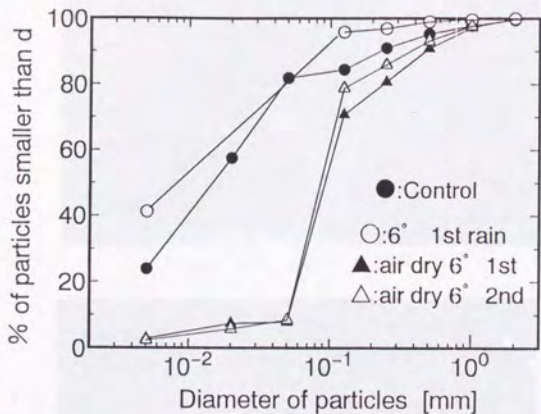


Fig. VII - 10(a) Particle distribution of Wash
(Yamanashi clay loam 6° slope)

地表面流出中の土砂の粒径組成 (山梨粘土ローム、6° 斜面)

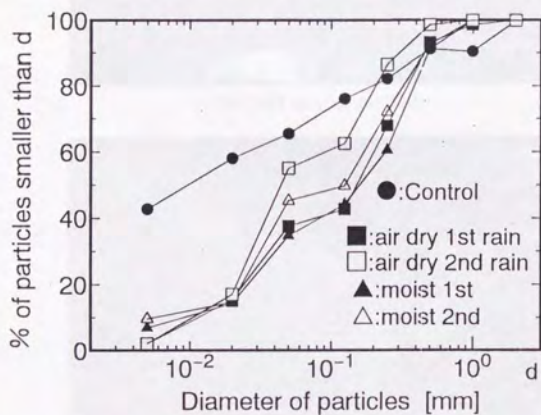
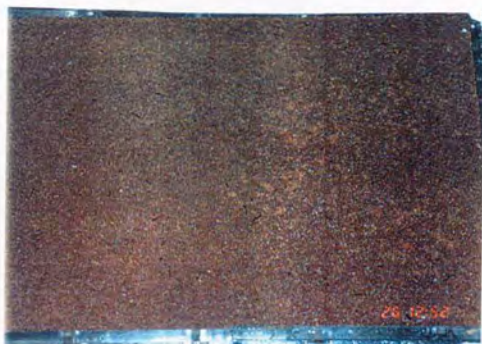
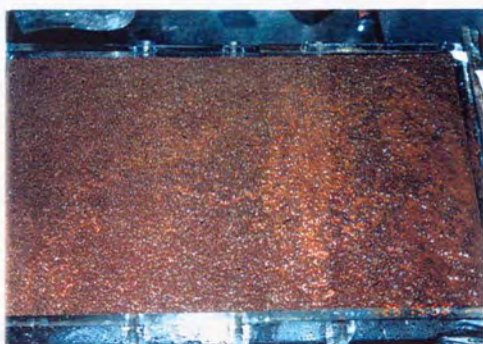


Fig. VII - 10(b) Particle distribution of Wash
(Kunigami maji 6° slope)

地表面流出中の土砂の粒径組成 (国頭マージ、6° 斜面)



(a) 170 min of rainfall



(b) 360 min of rainfall



(c) 720 min of rainfall

Photo VII-1 Changes of surface feature due to rainfall (Maji, air dry)
降雨中の地表面の変化（クラストの形成、団粒の減少により
のっぺりした部分が増える。 国頭マージ、風乾土の場合）

なった。wash、splashとも結果としては、貫入抵抗と負の相関を示したが、これは、土による違いなのか、土壌の硬さによる影響なのかが今回の実験からははっきりしない。この点を明らかにするためには、同じ供試土について、乾燥密度を変えするなどして地表面硬度を変えて侵食実験を行う必要がある。

また、クラスト形成による地表面硬度の変化が受食性に及ぼす影響は、降雨1時間後の十分湿った状態では、貫入抵抗値がクラストの有無によって影響されないという結果が得られた（第IV章）。今回の実験結果の範囲では、クラスト形成によるsplashの減少は、雨滴によって飛散しやすい土粒子（団粒）が侵食及びクラストの形成によって減少したためその後の降雨では飛散量が少なくなったと考えられる（Photo VII-1）。

washについても、降雨によって壊れやすい団粒、土粒子は、降雨開始後早い時期に崩壊したり、wash、splashという形で流亡したりして、残った粒子は、大きく頑健なもののみになっているものと考えられる。これは、噴出降雨装置の小さな雨滴では壊れにくい風乾土の際に流亡土量が少なくなることからも推察される。

VII.6 まとめ

室内人工降雨装置と小型ライシメータを用いた実験で、クラスト形成による土壌流亡の変化を調べた。

今回の結果では、クラストの形成に伴って、山梨粘土ロームの11°の条件を除いて流亡土量が減った。11°の場合は、地表面流出の作用が傾斜が大きくなったことにより顕著になったことが理由と考えられる。しかし、斜面長が短いライシメータという条件であるため、実際の圃場の土壌流亡がこのような傾向になるとは必ずしもいえないと考えられる。この検証は、より長いライシメータにより行う必要がある。

自作のペネトロメータを用いて貫入抵抗とwash濃度の関係を考察した結果、供試土間においては、貫入抵抗の増大とwash濃度の低下が一致した。このことから、貫入抵抗による侵食性の評価は有効である可能性があると考えられる。しかし、貫入抵抗測定上の問題からクラスト形成による貫入抵抗の変化は、高水分時には検出されず、流亡土量との比較もできなかった。今後は、貫入抵抗測定の規格化、特に貫入方式について、ならびに測定データの蓄積による定量的な評価が課題と

なる。

第1 米軍の進出による従軍記者の活躍の状況

（1）従軍記者の活躍

1945年、従軍記者として活躍し、戦後、記者と作家としての活躍の場を広げたのは、従軍記者時代の経験から得たもので、その中でも、従軍記者時代の経験が最も大きな影響を与えている。従軍記者時代の経験が、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由は、戦時中、従軍記者として活躍したことが、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。従軍記者としての経験は、戦時中、従軍記者としての経験を通じて、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。従軍記者としての経験は、戦時中、従軍記者としての経験を通じて、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。

従軍記者としての経験は、戦時中、従軍記者としての経験を通じて、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。従軍記者としての経験は、戦時中、従軍記者としての経験を通じて、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。

第2 戦後の状況

戦後の状況は、戦時中の状況とは異なり、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。戦時中の状況とは異なり、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。戦時中の状況とは異なり、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。

第3 戦後の状況、作家としての活躍

戦後の状況は、戦時中の状況とは異なり、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。戦時中の状況とは異なり、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。戦時中の状況とは異なり、戦後、作家としての活躍の場を広げた理由の一つである。

第Ⅷ章 酸性土壌への石膏の施用によるクラスト形成と受食性の変化

Ⅷ.1 石膏の施用による国頭マージ土壌懸濁液の沈降特性の変化

Ⅷ.1.1 土粒子濃度の影響

Fig.Ⅷ-1は、懸濁させる土粒子の量が土粒子の沈降に影響を与えるかどうかを確認した実験の結果である。沈降界面を観察するために、メスシリンダー内に水1000mlあたり30から240gの供試土を入れて超音波分散器で分散させた後に攪拌し、静置して沈降の様子を観察した。この供試土の量は、比重計法で粒径分布を測定する際に使用する量を参考に、沈降界面が観察しやすいような濃度を使用した。土壌にはヘキサメタリン酸Naなどの分散剤は与えず、pHも調節しなかった。これは、現場や降雨実験中の地表面における土壌の分散を想定しているためである。国頭マージでは、pHを調節しないと土壌懸濁液のpHは4.2から4.3程度の値を示した。またこの実験では、石膏は与えていない。

コロイド分散系では、コロイド濃度が高くなると凝集が促進されることがあるが、国頭マージでは、1000mlあたり30から240g程度の量では、沈降の様子に変化はないことが確認された。

Ⅷ.1.2 pHの影響

Fig.Ⅷ-2では、1000mlあたり30gの供試土量でpHの変化による分散、凝集、沈降の変化を観察したものである。石膏を与えていない場合、酸性側では、静置後速やかに沈降がすすむのに対して、pH7.55、ならびにpH9.5以上では、土壌が分散して、沈降しなかった。特に、pH9.5では、1日たっても全く沈降が起こらなかった (PhotoⅧ-1)。

Ⅷ.1.3 土粒子の沈降に及ぼす石膏の効果

Fig.Ⅷ-3は、Fig.Ⅷ-2の結果を参考にpH2.63,4.45、9.65の条件に石膏を1g与えて分散、凝集、沈降の変化を観察した結果である。

pH2.63、4.45の酸性領域では、石膏の投与によって界面沈降が遅くなっていることがわかる (PhotoⅧ-2)。しかしながら、pH9.65では、石膏なしの場合では

分散が著しく、24時間後でも分散状態が続いたのにも関わらず、石膏を加えると1時間でほとんどの土粒子が沈降してしまった。

VIII.1.4 希薄土壌懸濁液における石膏の効果

VIII.1.3の実験では、沈降界面を観察するために粒度分析で使用するような高濃度の土壌懸濁液で石膏やpHが分散に与える影響を調べた。しかし、降雨実験中の地表面流出中の土砂濃度は、はるかに小さく、多くの場合、水1000mlあたり1~10g程度である。そこで、本実験の地表面流出中の土砂濃度と同程度の 1g L^{-1} と 3g L^{-1} で石膏の土粒子沈降に与える影響を調べた。この実験でも、現場や降雨実験中の地表面における土壌の分散について基本的な知見を得ることを目的としたため、基本的にpHの調整は行わなかった。また、このような低濃度の土壌懸濁液では、界面沈降が観察できないので、結果は写真で示した。

Photo VIII-3(a~d)は、沈降開始後10、40、120分後ならびに6、24時間後のメスシリンダー内の懸濁液の様子を撮影したものである。

沈降開始後、10、40分においては、石膏を入れないメスシリンダー（土量3g、1gとも右側のメスシリンダー）は色が薄く、懸濁液中の土粒子密度が小さいことが推察される。120分後では、石膏の有無による違いはほとんどわからないが、24時間後では、石膏を入れたメスシリンダー内では、土粒子がすべて沈降し透明になっている。

この結果から、石膏の施用によって、懸濁当初（120分間程度）は、土壌の分散が促進されるが、その後時間がたつと逆に石膏を与えない場合よりも凝集・沈降が進むということがわかる。

後半の、凝集促進は、石膏を与えたことによる懸濁液の電解質濃度の増加による拡散二重層の圧縮や石膏中のCaとイオン交換して懸濁液中にでてきた Al^{3+} イオンと水が反応して形成する $\text{Al}(\text{OH})_3$ の架橋作用等が考えられる。初期の分散促進については、 Al^{3+} とイオン交換して Ca^{2+} イオンが土壌に吸着することによる土壌の電荷分布の変化や SO_4^{2-} の土壌への特異吸着による電荷バランスの変化などが考えられる。

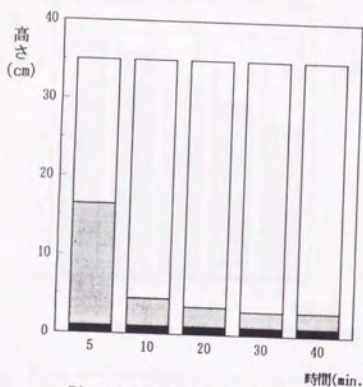


Fig. VII-1(a) 30 g、pH無調整、石膏0g

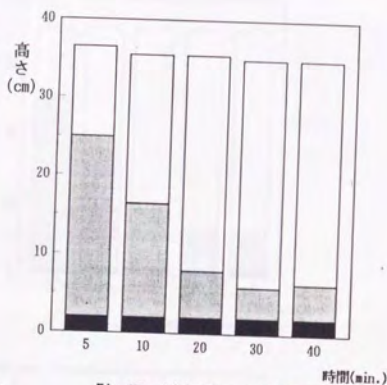


Fig. VII-1(b) 60 g、pH無調整、石膏0g

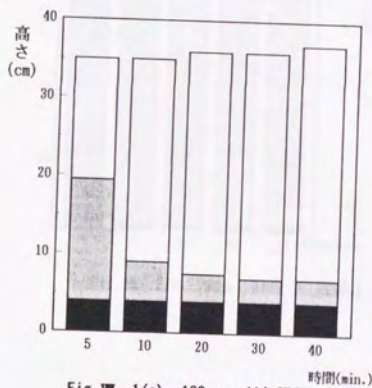


Fig. VII-1(c) 120 g、pH無調整、石膏0g

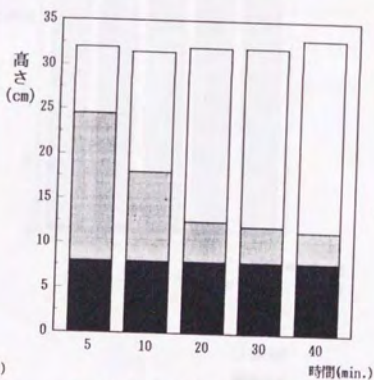


Fig. VII-1(d) 240 g、pH無調整、石膏0g

□ 透明部
 ■ 凝集部
 ■ 沈澱部

Fig. VIII-1 土砂濃度と沈降速度

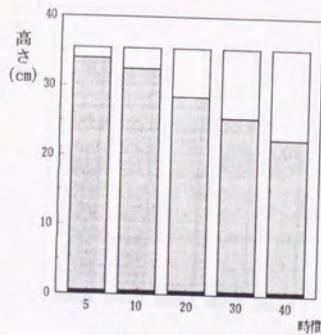


Fig. VIII-2(e) 30g、pH7.55、石膏0g

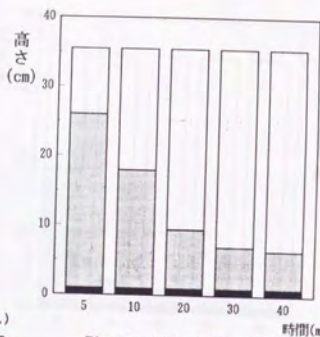


Fig. VIII-2(f) 30g、pH8.5、石膏0g

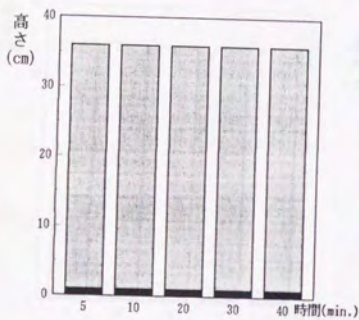


Fig. VIII-2(f) 30g、pH9.5、石膏0g

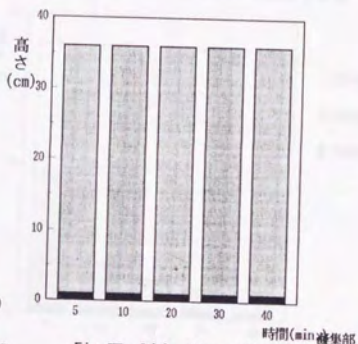


Fig. VIII-2(g) 30g、pH10.2、石膏0g

□ 透明部
 ■ 凝集部
 ■ 沈澱部

Fig. VIII-2 土粒子の沈降に及ぼすpHの影響 (国頭マージ)

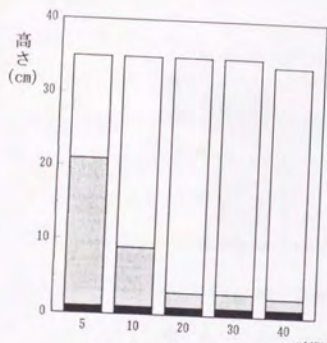


Fig. VII-2(a) 30g, pH1.22, 石膏0g

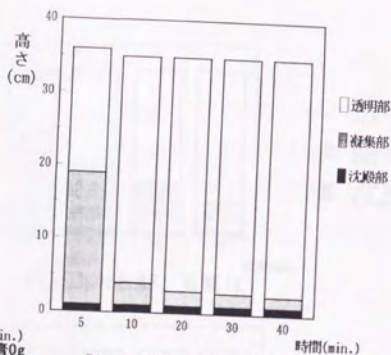


Fig. VII-2(b) 30g, pH3.32, 石膏0g

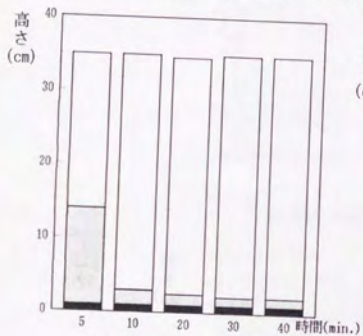


Fig. VII-2(c) 30g, pH4.38, 石膏0g

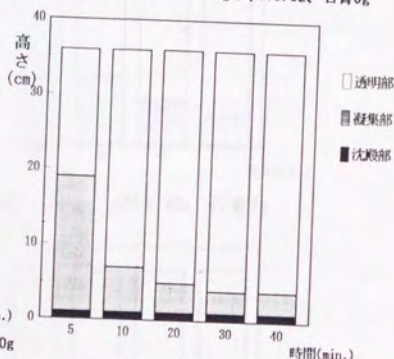


Fig. VII-2(d) 30g, pH7.0, 石膏10g

□ 透明部
 ■ 凝集部
 ■ 沈澱部

Fig. VII-2 土粒子の沈降に及ぼすpHの影響 (国頭マージその2)

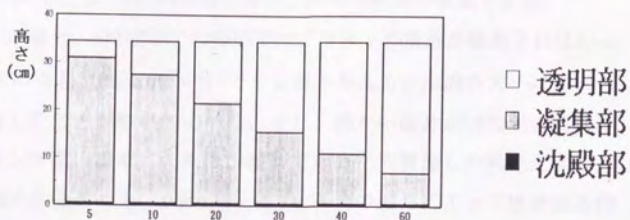


Fig. VIII-3(a) 30g、pH2.63、石膏1g

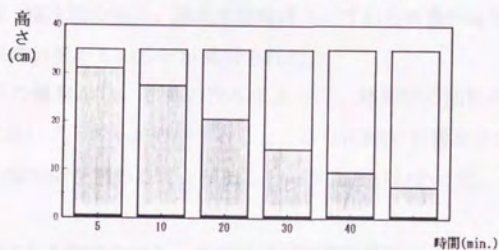


Fig. VIII-3(b) 30g、pH4.45、石膏1g

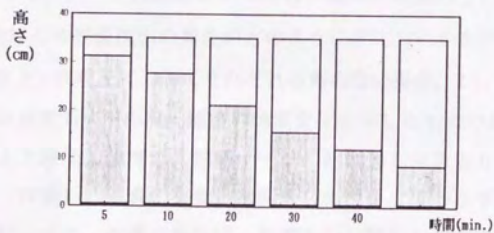


Fig. VIII-3(c) 30g、pH9.65、石膏1g

Fig. VIII-3 土粒子の沈降に及ぼす石膏の影響

Ⅶ.2 石膏の施用が土壌クラストの構造に及ぼす影響

PhotoⅦ-4,5に、粒径大と粒径小の団粒について石膏を与えたときの降雨後の土壌薄片の写真を示した。いずれの写真でもクラストの形成が確認できる。

特に、石膏無しの場合、6時間までの降雨ではクラストの形成が観察されなかった、湿土の団粒大の場合 (PhotoⅢ-2) でも石膏を与えると雨滴の大小に関わらずクラストが形成したことが特徴的である。また、細かい破片が団粒間の間隙を埋める非スレーキング型 (Ⅲ章) の特徴が顕著であった石膏無しの風乾土団粒大の条件や湿土団粒小の条件でも (PhotoⅢ-2,3) 石膏の投与によって地表面近傍1mm位の層では、団粒構造がほとんど失われている。

いくつかの試料 (湿土団粒径小、風乾土団粒径小いずれも石膏5tha⁻¹) では、団粒間の間隙を白い石膏が埋めているのが観察された。

以上の土壌薄片の観察から、石膏の投与によって、降雨中の団粒の分散が進み、スレーキング型に近いクラストが形成すること、さらに5tha⁻¹石膏を与えると、溶けきれない石膏が土壌間隙を埋めることがあるということがわかった。

Ⅶ.3 石膏の施用による降雨の浸入、地表面流出発生の変化

Fig.Ⅶ-4は、ライシメータ実験において石膏の施用や初期水分によって降雨開始後240分間における地表面流出の発生がどのように変化したかを示したものである。図中には、湿土、風乾土についてそれぞれ石膏のない場合、2.5、5tha⁻¹を施用した場合の降雨中の地表面流出の流出速度の時間変化を示したものである。

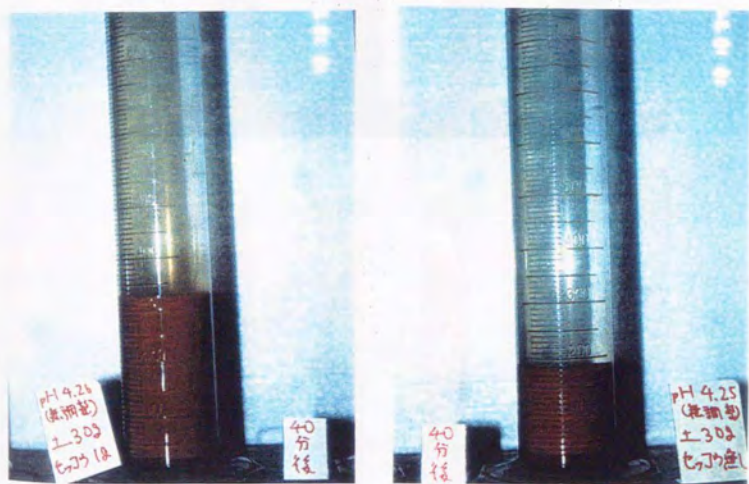
実験に用いた人工降雨の強度は、国頭マージの飽和透水係数よりも小さいものであるが (第Ⅱ、Ⅳ章)、石膏の有無、初期水分の大小に関わらず降雨中に地表面流出が発生した。また、石膏の施用は、初期水分に関わらず地表面流出の発生を促進した。

湿土の場合、地表面流出の発生時間は若干早くなった程度であるが、石膏を与えた条件において地表面流出発生直後の流出の増加が著しかった。風乾土の場合、石膏を与えない条件では、地表面流出発生までに120分以上の降雨を必要としたが、石膏を与えることにより、地表面流出の発生が45分から60分と半分以下の降雨時間で地表面流出が発生した。

このような地表面流出発生の原因を考えるため、第Ⅵ章同様ライシメータ地表



Photo VII-1 pH9.5の土壤懸濁液の沈降開始後24時間後の様子



(a) 石膏あり(1g L⁻¹)

(b) 石膏無し

Photo VIII-2 石膏を与えたときの土壤懸濁液の沈降状況 (沈降開始後40分)

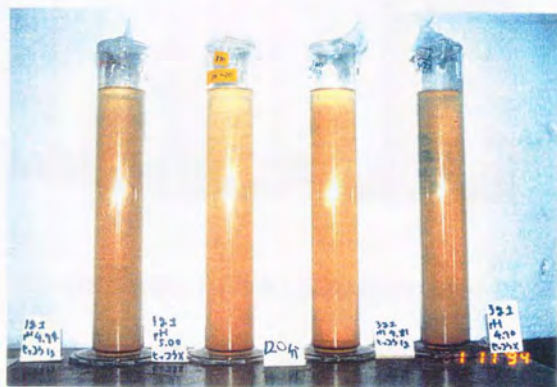
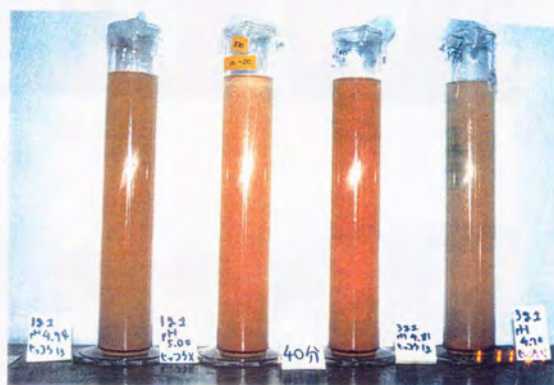
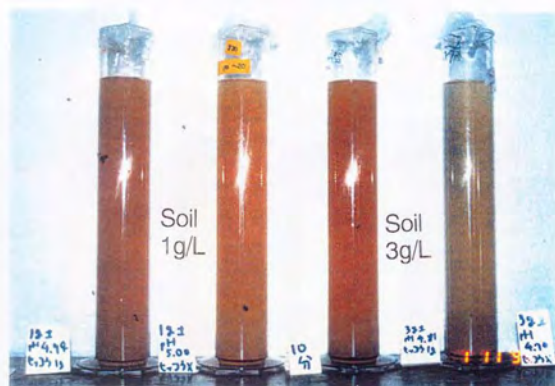
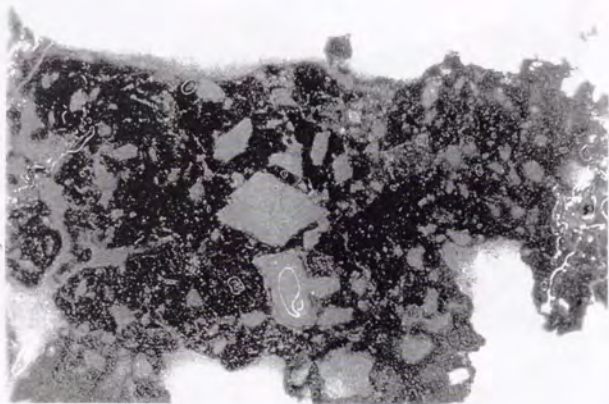


Photo VIII-3(a) 石膏の有無による希薄土壌懸濁液内の土粒子の沈降の変化
上から沈降開始後 10、40、120 分後の様子



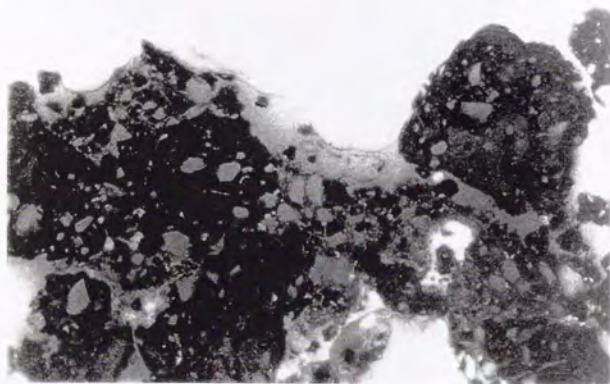
Photo VIII-3(b) 石膏の有無による希薄土懸濁液内の土粒子の沈降の変化

上から沈降開始後 6、24 時間後の様子



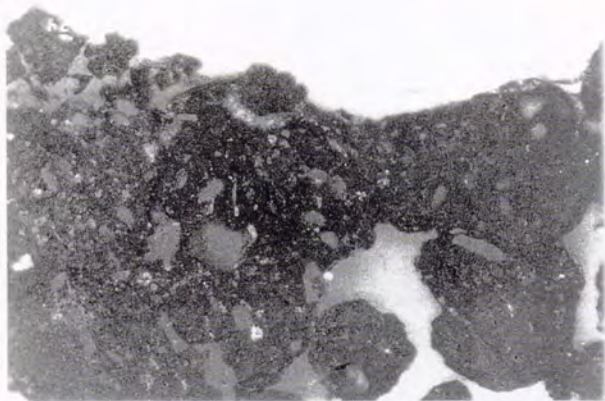
(a) 湿土、団粒径：大、雨滴径：大(降雨6hrs)、石膏 5tha^{-1}

1 mm

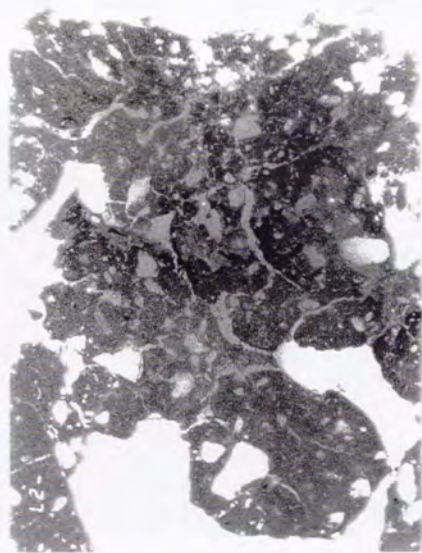


(b) 湿土、団粒径：大、雨滴径：小(降雨4hrs)、石膏 5tha^{-1}

Photo VIII-4 粒径大(3~5mm)団粒試料の降雨後の土壤構造



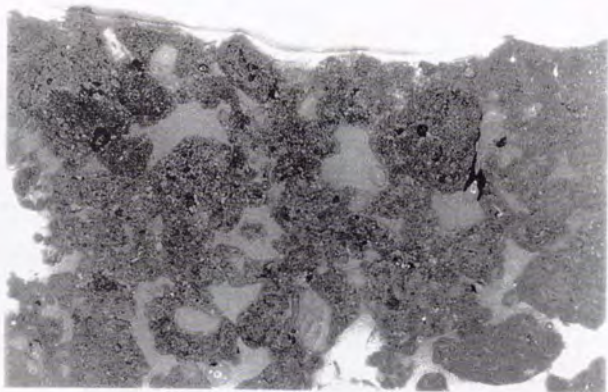
(c) 風乾土、団粒径：大、雨滴径：大(降雨4hrs)石膏 2.5tha^{-1}



1 mm

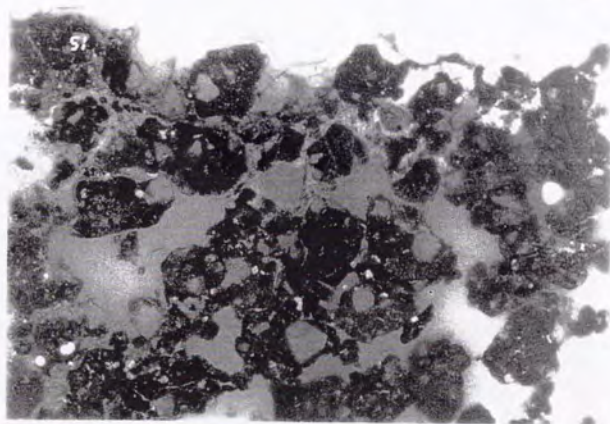
(d) 風乾土、団粒径：大、雨滴径：小(降雨4hrs)石膏 5tha^{-1}

Photo VIII-4 粒径大(3~5mm)団粒試料の降雨後の土壤構造(続)



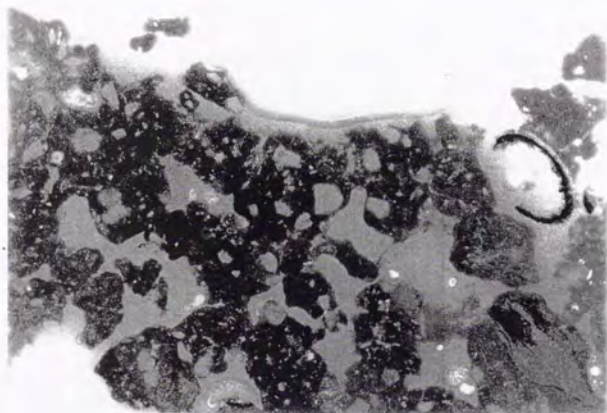
(a) 湿土、団粒径：小、雨滴径：大（降雨4hrs）石膏 5tha^{-1}

—|—|
1 mm



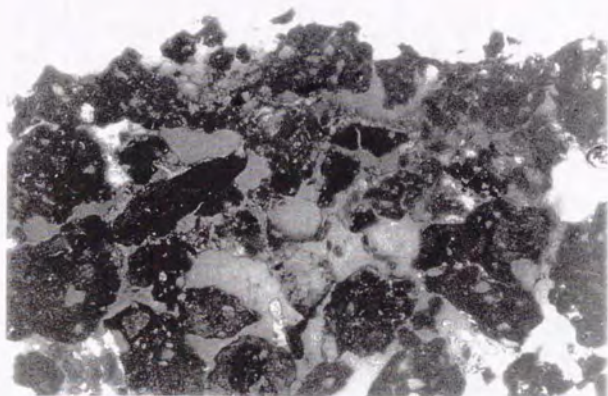
(b) 湿土、団粒径：小、雨滴径：小（降雨4hrs）石膏 5tha^{-1}

Photo VIII-5 粒径小(1~3mm)団粒試料の降雨後の土壤構造の様子



(c) 風乾土、団粒径：小、雨滴径：大（降雨4hrs）石膏 5tha^{-1}

—|—|
1 mm



(d) 風乾土、団粒径：小、雨滴径：小（降雨4hrs）石膏 5tha^{-1}

Photo VIII-5 粒径小(1~3mm)団粒試料の降雨後の土壤構造の様子 (続)

Table VII-1. 地表面流出・ライシメータ底部排水の発生時間とフラックス
Runoff and effluent from lysimeter during a rainfall

名称	石施用量 [t ha ⁻¹]	地表面流出 発生時間 (min)	定常地表面 流出速度 (cm s ⁻¹)	定常地表面 流出発生時 (min)	定常地表面流 排水速度 (cm s ⁻¹)	最小下部 排水速度 (cm s ⁻¹)	最小底部排水 速度発生時 (min)	最大底部排 水速度 (cm s ⁻¹)	最大底部排水 速度発生時 (min)
moist	1	55	9.2×10^{-4}	115	1.5×10^{-4}	*	*	1.2×10^{-3}	24
	2	57	6.8×10^{-4}	145	1.2×10^{-4}	*	*	8.6×10^{-4}	34
	3	20	7.1×10^{-4}	115	1.4×10^{-4}	*	*	7.6×10^{-4}	27
	4	2.5	6.5×10^{-4}	55	2.1×10^{-4}	*	*	3.2×10^{-4}	24
	5	2.5	6.4×10^{-4}	85	1.5×10^{-4}	*	*	5.0×10^{-4}	22
	6	5	3.5×10^{-4}	55	2.5×10^{-4}	*	*	5.9×10^{-4}	14.5
	7	5	4.8×10^{-4}	65	3.1×10^{-4}	*	*	4.3×10^{-4}	19
air dry	1	120	7.0×10^{-4}	*	3.2×10^{-4}	*	*	9.4×10^{-4}	45
	2	200	5.5×10^{-4}	405	2.9×10^{-4}	*	*	1.0×10^{-3}	66
	3	2.5	6.5×10^{-4}	115	2.0×10^{-4}	150	150	2.2×10^{-4}	81
	4	2.5	5.4×10^{-4}	145	2.8×10^{-4}	155	155	7.2×10^{-4}	71
	5	5	4.3×10^{-4}	85	3.4×10^{-4}	*	*	3.6×10^{-4}	135
	6	5	1.2×10^{-4}	175	4.8×10^{-4}	*	*	6.2×10^{-4}	90

*: 降雨終了直前の値

** : 地表面流出速度の変化が小さくなった時点

面における浸入速度とライシメータ底部からの排水速度について調べた。Fig.VIII-5は、その代表的な結果を示したものである。風乾土に石膏を与えた場合も湿土に石膏を与えた場合も降雨開始後、地表面における浸入速度が低下し始めその低下に対応するようにライシメータ底部からの排水速度も低下し、湿土では降雨開始後20分、風乾土では降雨開始後75分頃に地表面における浸入速度とライシメータ底部からの排水速度が一致し、その後は同じように低下して一定値に漸近するという結果となった。このことから石膏を与えた場合でも地表面流出発生の促進、ライシメータ底部からの排水の減少は、地表面の透水性の低下すなわち地表の土壌クラストの形成によるものであることがわかる。この地表面流出発生の変化から、石膏の施用によって降雨中の土壌クラストの形成を促進したとみなせる。

Fig.VIII-6,7は、湿土、風乾土について降雨中のライシメータ底部からの排水速度を示したもので、(a)が石膏なしの場合、(b),(c)がそれぞれ石膏 $2.5t\ ha^{-1}$ 、 $5t\ ha^{-1}$ を施用した場合の結果である。

湿土においては、石膏を与えることによって、排水速度のピーク値が低くなるとともに排水速度のばらつきも小さくなった。風乾土の場合は、ピーク値が小さくなるとともにピークを示す時間が短くなった。石膏を与えない場合には、降雨強度と同じ排水速度が約60分間続いたのに対して $2.5t\ ha^{-1}$ 石膏を与えた場合には、ピークは一瞬で、かつ降雨強度の半分程度の値を示し、 $5t\ ha^{-1}$ 与えた場合には、ピークは存在しなかった。

ライシメータ底部からの排水の定常値（または最小値）は、石膏なしの条件と $2.5t\ ha^{-1}$ 与えた条件では、変わらなかった。風乾土の石膏なしの条件では、図中で降雨開始後240分で底部からの排水速度が $5 \times 10^{-4} cm\ s^{-1}$ 程度になったが、その後も降雨を続けると、降雨開始後400分後には、 $2.9 \times 10^{-4} cm\ s^{-1}$ になった（表VIII-1）。これは、石膏 $2.5t\ ha^{-1}$ の場合とほぼ同じ値である。石膏を $5t\ ha^{-1}$ 与えた場合は、湿土、風乾土の場合とも他の石膏投与条件よりも大きな排水速度を示した。実験中の観察では、 $5t\ ha^{-1}$ の場合は、4時間の降雨終了時においても地表面に石膏が白く残るのに対して $2.5t\ ha^{-1}$ 施用した場合は、降雨終了時には、石膏は全くなくなっている。おそらく、この降雨4時間後まで白く石膏が残る部分では、石膏がマルチの効果を果たして土壌クラストの形成が遅れ、この部分から降雨が浸透しやすくなるためにライシメータ底部からの排水速度が大きくなったと考えられる。さらに、前節で述べたよう

に、ライシメータ実験に使用した供試土と同じ団粒径小では、 5t ha^{-1} 石膏を投与した場合、石膏が間隙を埋めるという現象が観察された。水溶性の石膏によって閉塞した間隙は、降雨の継続によって閉塞している石膏が溶けて行くなど、閉塞の状況が時間的に変化するものと考えられる。長時間の降雨によって浸入速度がさほど低下しない理由の一つにこの石膏による目詰まりの寄与も考えられる。これに対応して、定常時または降雨開始後240分後の地表面流出速度でも、石膏 5t ha^{-1} を与えた条件では他の条件に比べて地表面流出が小さくなっていた。

降雨中に石膏が地表面に残存するかしないかは、石膏の溶解度(2.08 g L^{-1})から検討することができる。地表面に 2.5 t ha^{-1} の割合で散布した場合は、実際には地表面に 37.5g の石膏を撒くことになる。これに対してたとえば降雨強度 30mm h^{-1} で4時間降雨を与えたとすると、地表面に与えられた水の絶対量は、ライシメータからの飛散等による損失を考えないと 18 L になる。この水量に溶解できる石膏の量は最大で 37.44g となり 2.5 t ha^{-1} の割合で散布した石膏の量とほぼ等量になる。実際には、飛散する水滴とともにライシメータ周辺に飛び散る分や土壌と交換吸着を起こす分もあるのでもう少し水に溶ける可能性があると考えられるが、 5t ha^{-1} に相当する2倍の 75g 溶解するのは困難である。したがって、 5t ha^{-1} 施用した場合は4時間の降雨後に石膏が地表面に残っていたのは、降水に溶解できなかった分と考えられる。これは、逆に言えば、圃場においてどの程度の期間散布の効果を持続させたいという要求があれば、積算降雨量から施用量を決めることができるということである。今回の実験では、 2.5 t ha^{-1} 施用した場合は、積算降雨 120mm 、 5t ha^{-1} 施用した場合は、積算降雨 240mm まで石膏が地表面に残存した。

石膏の施用がクラスト部の透水係数に及ぼす影響は、Table VIII-2のようになった。IV章で示した結果同様、ライシメータ内の深さ 1cm の位置3カ所で測定したマトリックポテンシャルの平均値とライシメータ底部からの定常排水速度を用いて算出したものである。湿土の場合、石膏の施用によってクラストの透水係数は若干増した。とくに、 5t ha^{-1} 与えた場合は、III章で見たように間隙に溶け残った石膏が目つまりしていることが確認されている。また、地表面にも溶け残った石膏があることなどから、降雨の浸透が石膏なしの場合よりも若干大きな値を示した理由と考えられる。風乾土の場合も 5t ha^{-1} 与えたときに若干大きな値を示した。

湿土、風乾土とも石膏施用に伴ってクラストの透水性に若干の増加は見られた

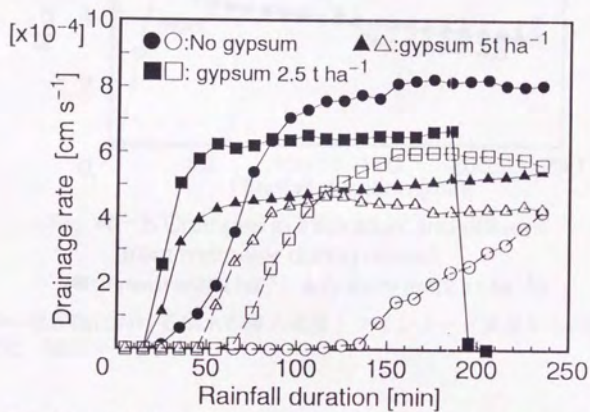


Fig. VIII-4 Effects of initial water contents and gypsum application on runoff event

(Close and open dots show results of airy and moist soil respectively)
 初期水分、石膏の施用が降雨中の地表面流出に及ぼす影響 (国頭マージ)

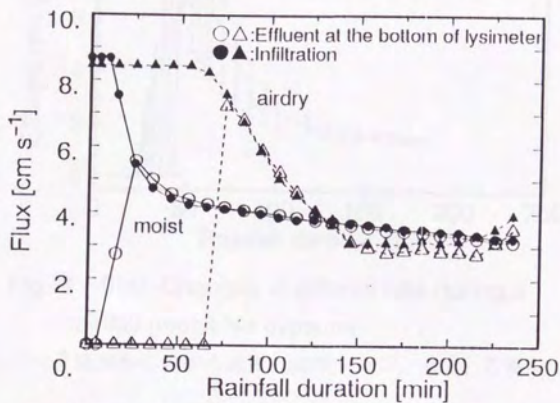


Fig. VIII-5 Changes in infiltration and effluent from lysimeter during rainfall

(●○:moist soil(5t ha⁻¹), ▲△:airdry soil(2.5 t ha⁻¹))

降雨中の地表面における雨水の浸入速度とライシメータ底部からの排水速度の時間変化 (国頭マージ)

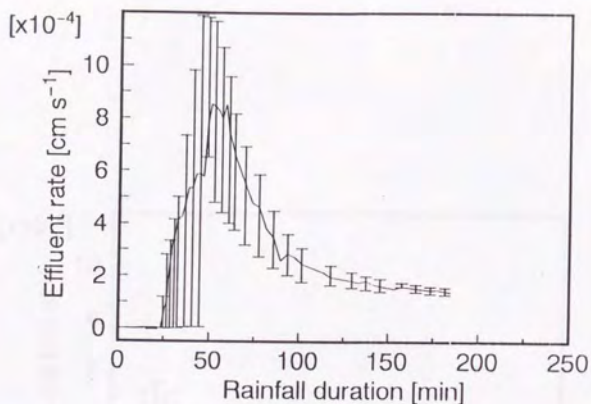


Fig. VIII-6(a) Changes in effluent rate during a rainfall (moist No gypsum)

ライシメータ底部からの排水速度 (国頭マージ、湿土、石膏なし)

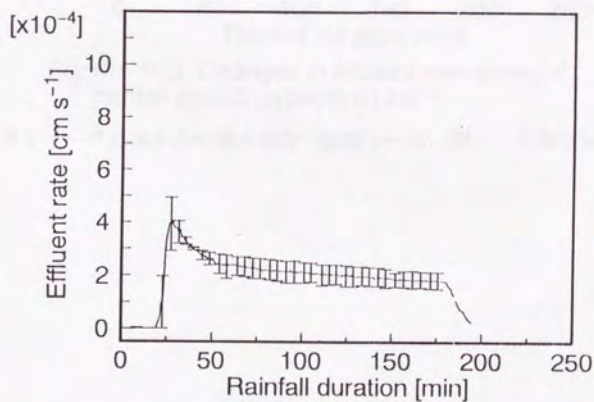


Fig. VIII-6(b) Changes in effluent rate due to gypsum application (moist, gypsum: 2.5 t ha^{-1})

ライシメータ底部からの排水速度 (国頭マージ、湿土、石膏 2.5 t ha^{-1})

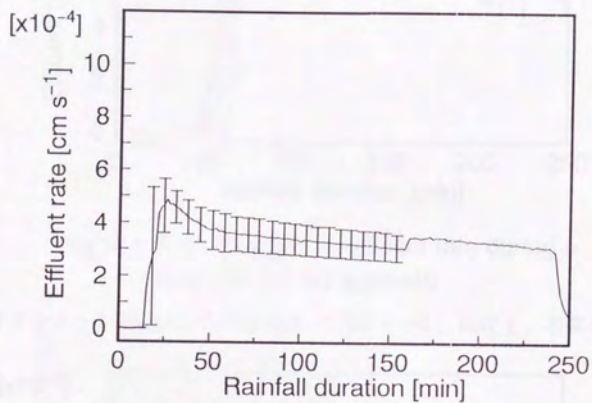


Fig. VIII - 6(c) Changes in effluent rate during a rainfall (moist, gypsum:5 t ha⁻¹)

ライシメータ底部からの排水速度 (国頭マージ、湿土、石膏5t ha⁻¹)

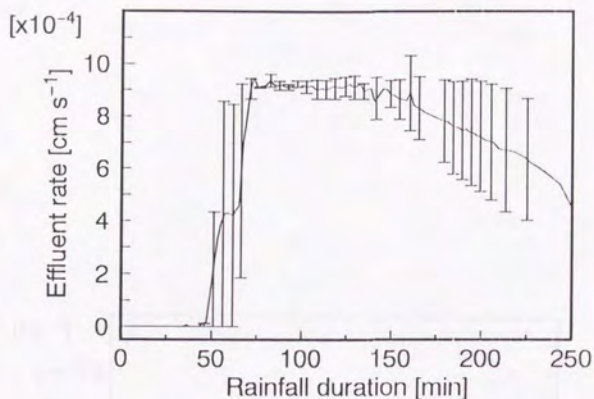


Fig. VIII-7(a) Changes in effluent rate during a rainfall (airdry, No gypsum)

ライシメータ底部からの排水速度 (国頭マージ、風乾土、石膏なし)

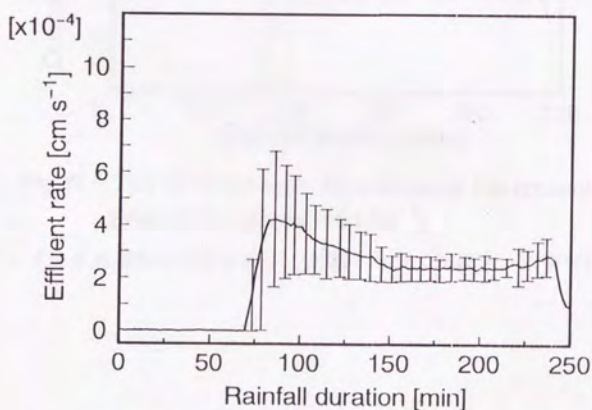


Fig. VIII-7(b) Changes in effluent rate during a rainfall (air dry, gypsum:2.5 t ha⁻¹)

ライシメータ底部からの排水速度 (国頭マージ、風乾土、石膏2.5t ha⁻¹)

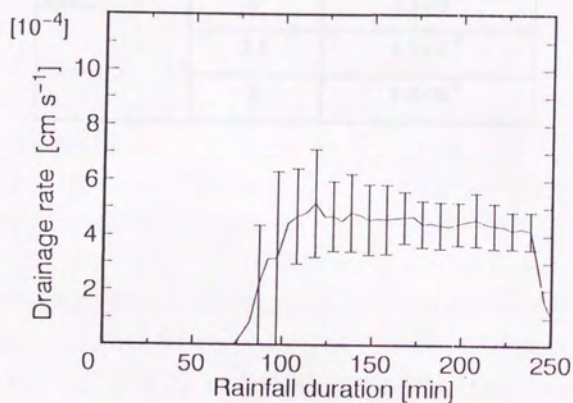


Fig. VIII-7(c) Effluent from the bottom of the lysimeter
(Maji airdry gypsum: 5 t ha^{-1})

ライシメータ底部からの排水速度 (国頭マージ、風乾土、石膏 5 t ha^{-1})

Table VII-2 石膏の施用とクラストの透水係数(ライシメータ実験、国頭マージ)

初期水分状態	石膏施用量 [t ha ⁻¹]	クラストの透水係数 [cm s ⁻¹]
湿土	0	1.1×10 ⁻⁵
	2.5	2×10 ⁻⁵
	5	3×10 ⁻⁵
風乾土	0	3.3×10 ⁻⁵
	2.5	2.1×10 ⁻⁵
	5	4.6×10 ⁻⁵

が、変化量は小さく、石膏による間隙の閉塞を除いてクラストの透水性への石膏の寄与はないものと考えられる。

Ⅷ.4 石膏の施用による受食性的変化

Fig.Ⅷ-8は、降雨中の地表面流出中の土砂濃度の時間変化を示したものである。地表面流出自体は、前述したように石膏の施用によって促進された。地表面流出中の土砂濃度についても、湿土、風乾土とも石膏の施用によって濃度が高くなったと見ることができる。

湿土の場合は、地表面流出発生直後に高い土砂濃度を示しその後漸減した。石膏の施用量にもよるが、濃度のピークは石膏なしの条件よりも高かった。2.5t ha⁻¹、5t ha⁻¹の場合ともピークを示した後に土砂濃度は漸減し、定常値に漸近したが、定常値に関しては、石膏のない場合と同程度であった。

風乾土の場合も、石膏を施用した場合は、地表面流出発生直後に高い土砂濃度を示し、その後漸減したのに対して石膏を与えない条件では、地表面流出発生後土砂濃度が徐々に増加して定常値に至った。風乾土の場合も地表面流出発生直後の土砂濃度変化には差があるが、定常値は、石膏がない場合と同じくらいの土砂濃度を示すものと考えられる。

Fig.Ⅷ-8で、湿土、風乾土のいずれの場合も石膏の施用によって短時間で高濃度の土砂が地表面流出によって流亡するという事は、重要な結果である。一般に台風の時を除いて、夕立のような強い雨は長時間は続かない。今回の結果から類推すると、石膏を与えた場合は、夕立のような短時間の降雨でも侵食が生じかねないということを示している。

一方、定常値が同程度という結果は、クラストが形成した後の2回目以降の降雨における侵食性は、1回目の降雨における石膏の施用の有無の影響を受けにくいということを示している。

Fig.Ⅷ-9は、地表面流出発生中の平均の土砂濃度と施用した石膏の量の関係である。湿土に関しては、石膏の量に関係なく石膏の施用によって30%ほど平均の土砂濃度が上昇した。風乾土の場合は、石膏の量が増すほど地表面流出中の土砂濃度も高くなり、5t ha⁻¹施用した場合は、石膏を与えない場合の約3倍の濃度となっていた。 Fig.Ⅷ-10は、降雨中にwashとして流亡した土の量と施用した石膏の量

の関係を示したものである。石膏を施用することによって土壌の分散が促進され、地表面流出中の土砂濃度は増す(Fig.VIII-9)。他方、地表面流出に着目すると、石膏を $5t\ ha^{-1}$ 施用した場合のように、溶け残った石膏が地表を覆うマルチの様な役割を果たして地表面流出を抑制することもある。Fig.VIII-10は、土砂濃度と地表面流出の両方の寄与を含んだ、受食性に及ぼす石膏の影響を示すものである。

湿土の場合、石膏の施用によって地表面流出による侵食量は減少した。これは、Fig.VIII-11に示したように、石膏の施用によって定常な地表面流出速度が低下したためと考えられる。風乾土の場合は、逆に地表面流出の促進がwashによる流亡を増やしたものと考えられる。この場合も、 $5t\ ha^{-1}$ 施用した場合には、地表面流出が減り、その結果washによる流亡土量が減ったと考えられる。

Fig.VIII-11は、降雨中の飛散による流亡土量(splash)の時間変化を示したものである。供試土や初期水分によって実験時間が異なるため単位面積、単位時間当たりの流亡量(splash速度)で示した。

湿土の場合、石膏を与えるとsplash速度は降雨開始直後に、石膏を与えない条件よりも大きくなったが、降雨開始後50分以降すなわち、石膏なしの場合に地表面流出が発生した後は、 $2.5t\ ha^{-1}$ 、 $5t\ ha^{-1}$ の場合ともに石膏のない場合に比べて5分の1程度のsplash流亡量になった。降雨開始直後に大きくなるのは、第VII章で示したように、表面に湛水が生じるとsplashが地飛躍的に増加するためと考えられる。すなわち、石膏を与えることにより、地表面流出の発生が早くなるために降雨開始直後のsplash速度が石膏の与えない条件の時より大きかったものと考えられる。地表面流出発生後のsplash速度が石膏を施用すると小さくなるのは、石膏によって団粒の分散が促進することにより、水滴とともに飛散する粒子の一つ一つが小さくなることや、速やかに形成し終わってしまったクラストからは、splashが減ることなどが原因と考えられる。実際、石膏を施用しない場合には、 $1\sim 3mm$ 径の団粒が雨滴の飛散とともにライシメータ外へ飛び出すのに対して、石膏を与えたライシメータでは、細かい土粒子の懸濁液がライシメータ外へ飛び散るという違いが実験中に観察された。また、降雨開始後早くにクラストが形成することによって、地表面の緻密度が早く高くなるために移動しやすい土粒子が減り、結果としてsplashが減少したということも考えられる。

風乾土の場合は、逆に石膏を与えた場合に splash 速度が増加した。これは、湿土の場合同様、石膏の施用による地表面流出（地表面湛水）発生の促進の結果である。

Fig. VIII-12は、各降雨中の平均の splash 量と石膏の施用量の関係を示したものである。湿土の場合は、石膏施用によるクラスト形成促進の効果で、平均の splash 量が石膏の施用とともに減少した。風乾土の場合は、石膏施用による地表面流出促進が splash 量を増加させるため、湿土の時のような減少は見られなかった。

Fig. VIII-13は、wash と splash を合わせた、ライシメータからの平均の土量流亡速度である。湿土の場合、長さ50cmのライシメータにおいては、石膏の施用によって土壤流亡速度が減少するという結果が得られた。一方、風乾土については、石膏の施用量が増すにつれて土壤流亡速度は微増した。

この、土壤流亡速度は、あくまで長さ50cmのライシメータについての結果である。地表面流出による土壤流亡効果は、斜面長が長くなるにつれて増すことが明らかになっている（Bryan and Posen 1989）。今回の結果で湿土において石膏を施用した際にライシメータからの流亡速度が減少したのは、splashの減少による寄与が大きい、しかし、実際の圃場では、splashの効果よりも地表面流出の効果の方が大きいことが多いので、石膏の効果は地表面流出を促進するという負の効果が卓越し、侵食が増す可能性がある。この点については、大型のライシメータまたは野外実験で斜面長を長くして検証するほか無い。

VIII.5 石膏の施用に伴う降雨中のイオン交換現象

VIII.5.1 降雨実験中の地表面流出水、ライシメータ底部からの排水のEC、pHの変化

Fig. VIII-14に降雨中の地表面流出水中の電気伝導度（EC）の時間変化を示した。第II章に示したように、国頭マージは、電気伝導度（EC, 1.5法）が非常に小さな値を示す。したがって、降雨中に、降雨のECよりも大きなECが観察された場合は、投与した石膏に由来するものと考えることができる。

湿潤試料の場合、地表面流出水のECは、地表面流出発生直後に、施用した石膏の量に関係なく石膏の飽和水溶液のEC（約 2dS m^{-1} ）に近い値を示した。地表面流出水のECは、その後徐々に減少したが、ECの漸減期においては、常に 5t ha^{-1} 与えた

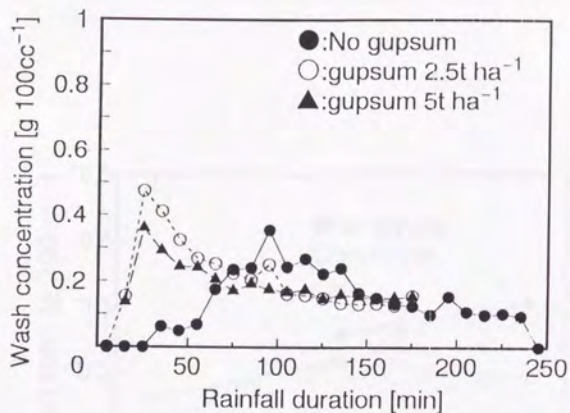


Fig.VIII-8(a) Changes in wash concentration during rainfall (moist, 6°)

降雨中の地表面流出中の土砂濃度の変化(国頭マージ、湿土、6° 斜面)

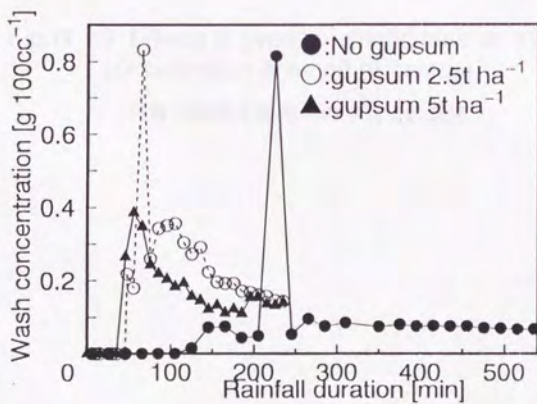


Fig.VIII-8(b) Changes in wash concentration during rainfall (airdry)

降雨中の地表面流出中の土砂濃度の変化(国頭マージ、風乾土、6° 斜面)

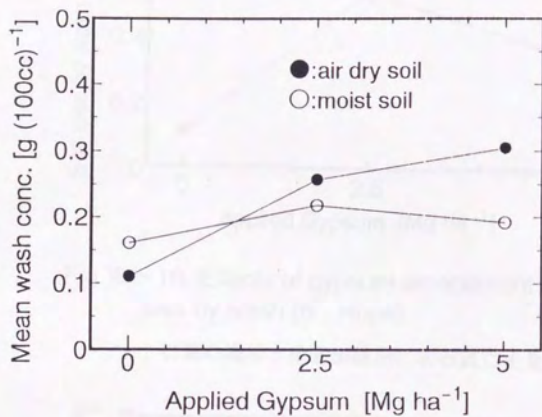


Fig. VIII-9 Effects of gypsum amendment on wash concentration in runoff (6° slope)

石膏の施用と降雨中の平均土砂濃度

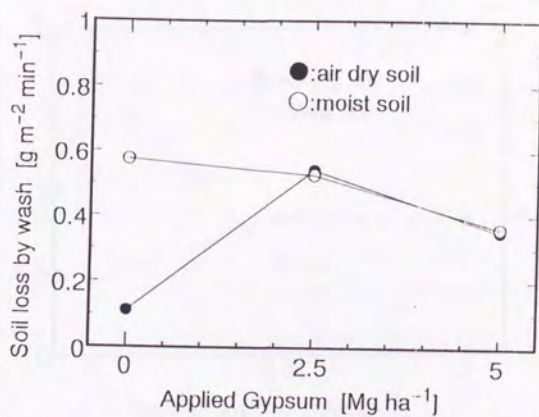


Fig. VIII - 10 Effects of gypsum amendment on soil loss by wash (6° slope)

石膏の施用と地表面流出による流亡土量

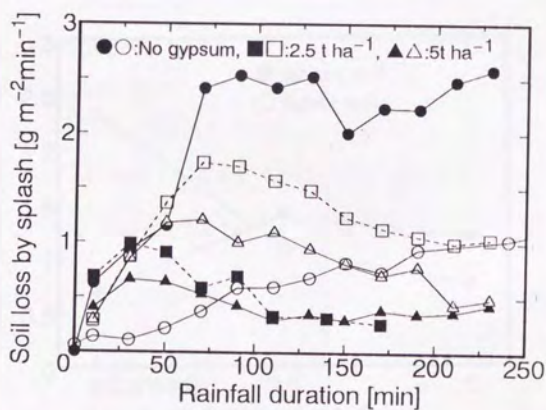


Fig. VIII - 11 Splash soil loss from lysimeter during rainfall (6° slope, ■▲●:moist soil, □△○:air dry soil)

降雨中の飛散による流亡土量の時間変化

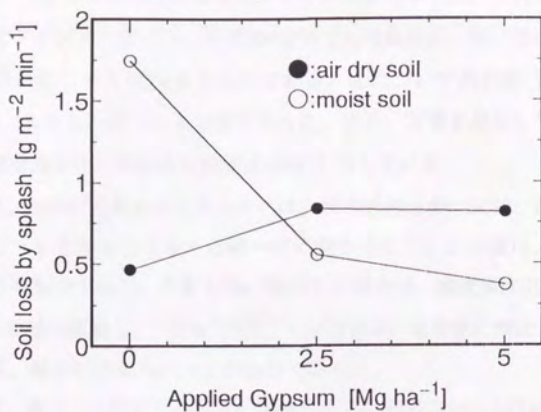


Fig. VIII - 12 Effects of gypsum amendment on soil loss by splash (6° slope)

石膏の施用と splash による土壌流亡

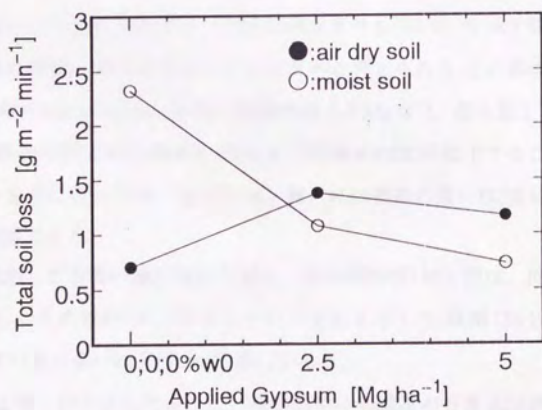


Fig. VIII - 13 Effects of gypsum amendment on soil loss from lysimeter (6° slope)

石膏の施用と降雨中の流亡土量

ときのECが、 $2.5t\ ha^{-1}$ 与えたときの結果よりも大きな値を示した。これは、実験中、 $5t\ ha^{-1}$ 与えたライシメータでは、降雨200分頃でも地表面の一部に溶け残った石膏が白く観察されたことを反映するものである。また、いずれのECも降雨のEC(Fig.VIII-18(a))よりもかなり大きな値であった。また、石膏を投与していない実験では、地表面流出水は、降雨水と同程度のECを示している。

風乾土の場合は、 $2.5t\ ha^{-1}$ 石膏を与えたときには、地表面流出水のECは、地表面流出発生時に特にピークを示すことなくほぼ一定の値を示した。この値は、降雨のECよりは若干大きなものである。石膏を $5t\ ha^{-1}$ 施用した場合は、地表面流出発生時に鋭いピークを示した後に漸減し、 $2.5t\ ha^{-1}$ の時よりは若干高い定常値に漸近した。また、このピークは、湿土の時よりは小さなものであった。

風乾土の場合は、湿土と比較して地表面流出発生までに時間がかかる(Table VIII-1)ため、地表面に施用した石膏の多くは、地表面流出発生までに土壤中へ降水の浸透とともに浸入し、その結果地表面流出のECが、湿土の場合よりも小さくなったものと思われる。

Fig.VIII-15は、ライシメータ底部からの排水のECを示したものである。図中、ライシメータ底部からの排水開始時に一時的に降水よりも高いECを示す結果がある。これは、下層の砂層に塩分が存在していたためと考えられる。この事は、底部からの排水量が砂層の1 pore volume(砂層の乾燥密度: $1.5\ Mg\ m^{-3}$ 、真比重: 2.7として降雨深で22mm、降雨時間で45分程度)になると下部排水のECが低下することと砂層の洗浄や交換を完全に行った時(図中の▲、■)には初期の高いEC値が観察されないことから確認できる。

湿土の場合、施用した石膏の量に関わり無く、降雨開始後150分間は、降雨水よりも低いECを示し、その後ECが上昇するという変化を示した。降雨150分以降のECの上昇は、石膏の量が多いほど($5t\ ha^{-1}$)著しかった。

風乾土では、Fig.VIII-14で示したように、降雨前半に高濃度の石膏水溶液が土壌に流れ込んだものと考えられる。そのため、ライシメータ底部からの排水は発生時からかなり高いECを示し、その値は時間と共にさらに増大した。ECの増大は、やはり $5t\ ha^{-1}$ 施用したときの方が $2.5t\ ha^{-1}$ 与えたときよりも著しく、石膏の飽和水溶液のECの値に近いところまで上昇した。

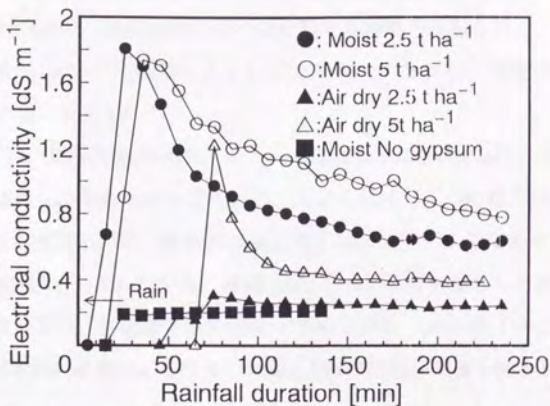


Fig.VIII-14 Changes in electrical conductivity of runoff during rainfall

降雨中の地表流出水の電気伝導度の変化

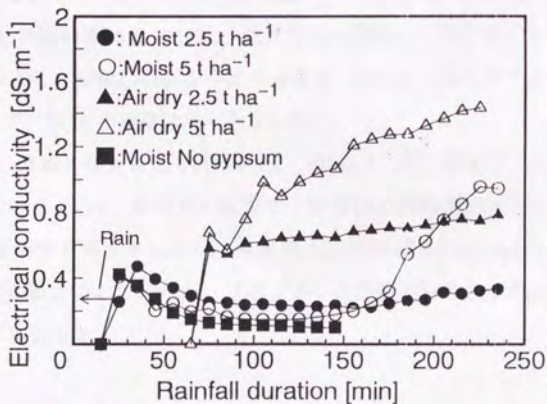


Fig.VIII-15 Changes in electrical conductivity of effluents from the bottom of lysimeter during rainfall

降雨中のライシメータ底部からの排水の電気伝導度の変化

Fig.VIII-16には、地表面流出水のpHの時間変化を示した。

地表面流出水のpHは、降雨初期に低い値を示すものなどがあるが、これは降雨水のpH (Fig.VIII-18(b)) の変動によるものである。すなわち、地表面流出水のpHは降水のpHと同じ値を示した。

Fig.VIII-17では、降雨実験中のライシメータ底部からの排水のpHを示した。ライシメータ底部からの排水のpHの変化には、大きく分けて二つの傾向があった。ひとつ目は、地表面流出水同様、降雨水のpHと同じ変化を示すものである。石膏を投与していない場合はもちろんながら、湿潤土に $2.5t\ ha^{-1}$ 石膏を投与した場合がこれに該当する。ふたつ目は、降雨途中から(100~175分以降) pHが低下するものである。これは、湿潤試料に石膏 $5tha^{-1}$ を投与した場合と風乾試料に石膏を投与した場合が該当する。

石膏を $5tha^{-1}$ 施用した場合の降雨中のライシメータ底部からの排水のpHの変化は、Fig.VIII-15で示したライシメータ底部からの排水のECの変化と対応している。すなわち、石膏を $5tha^{-1}$ 与えた場合は、湿土、風乾土ともFig.VIII-15で、ECが増加し始める時点(風乾土で降雨開始後90分頃、湿土で降雨開始後150分頃)と同じ時にpHの低下が開始する。石膏 $2.5t\ ha^{-1}$ を与えた場合は、風乾土で降雨終了直前にpHの低下が始まったが、ECとの関連ははっきりしない。

Fig.VIII-18には、降雨の性質として降水のEC、pHを示した。降水は、水道水をそのまま使用している。ECは、降雨毎の変動や一降雨内の時間変動が少なかったが、pHは、大きく変動する場合があった。降水のpHと地表面流出水のpHを比較すると同じ様な時間変動を示していたが、ライシメータ底部からの排水のpHは、降水のpHと無関係に変化した。

VIII.5.2 石膏の施用による国頭マージの化学性の変化

(I)降雨実験前後の国頭マージの陽イオン交換容量(CEC)、交換性陽イオンの変化
表VIII-3に国頭マージの陽イオン交換容量、交換性陽イオンを示した。

CECは、石膏の施用や降雨の有無では変化しなかった。一方、交換性陽イオンでは、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} の3種は絶対量も少ない。交換性 Na^+ は石膏の投与とは無関

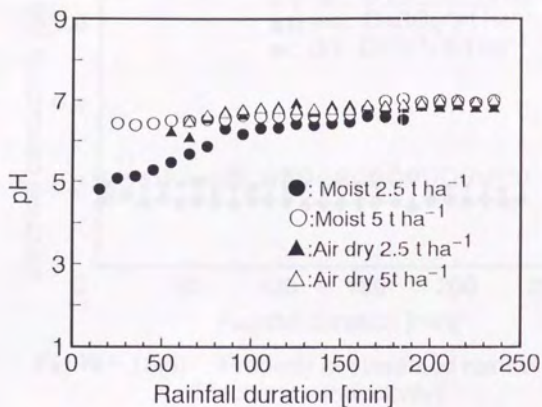


Fig. VIII-16 Changes in pH of runoff during rainfall

降雨中の地表面流出のpHの変化

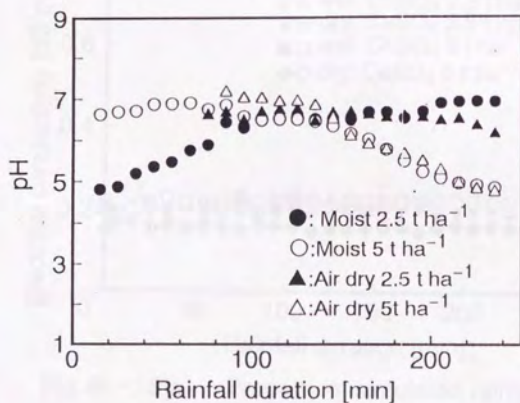


Fig. VIII-17 Changes in pH of effluents from bottom of the lysimeter during rainfall

降雨中のライシメータ底部からの排水のpHの変化

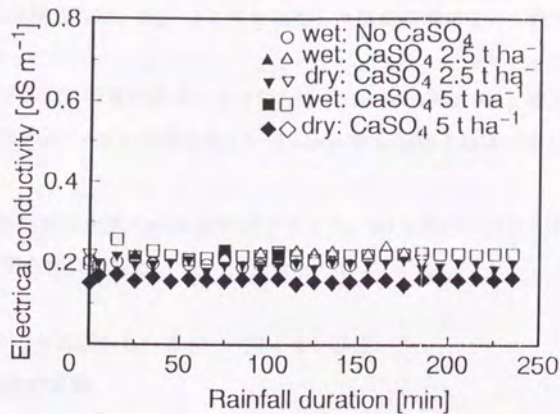


Fig. VIII - 18(a) Property of simulated rainfall
(Electrical conductivity)

降雨の性質 (電気伝導度)

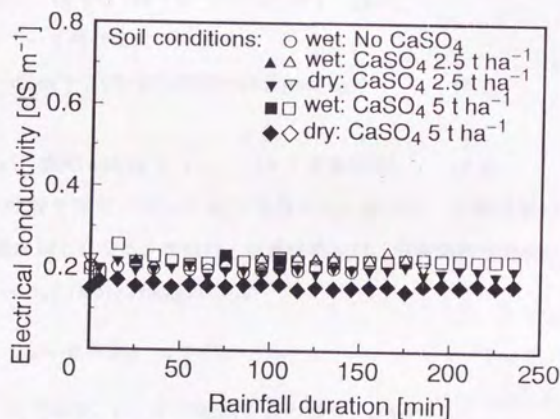


Fig. VIII - 18(a) Property of simulated rainfall
(Electrical conductivity (EC))

降雨の性質 (pH)

係であったが、交換性の K^+ 、 Mg^{2+} は石膏を施用した降雨実験によってわずかながら減っていた。

交換性 Ca^{2+} イオンは、石膏の投与によって1.56~2.82 meq/乾土100 g 増加した。この増分は、交換性の Al^{3+} イオンの変化量(1.6~1.8 meq/乾土100 g)とほぼ一致している。

(2) pHの変化

表VIII-4に降雨前後の土壌のpHの測定例を示した。pHも降雨の有無や石膏の投与の有無には影響されなかった。

VIII.5.3 ライシメータ底部からの排水中の陽イオン濃度

(1) ECと Ca^{2+} 濃度の変換

表面流出水、下部排水に含まれる陽イオンがCaイオンのみと仮定し、Mehta(1994)によって得られたECと溶質濃度の実験式から石膏水溶液中の活量を次式で表すことが出来る。

$$\text{溶液の活量}[\text{mol kg}^{-1}] = 3.718 \times 10^{-3} \times \text{EC}[\text{dS m}^{-1}] \quad (8-1)$$

この式は、ECについて解けば、

$$\text{溶液のEC} [\text{dS m}^{-1}] = 2.69 \times 10^2 \times \text{溶液の活量}[\text{mol kg}^{-1}] \quad (8-2)$$

ここで、活量は、

$$\text{活量}[\text{mol kg}^{-1}] = \text{濃度}[\text{mol kg}^{-1}] \times \gamma \quad (\gamma: \text{活量係数}) \quad (8-3)$$

である。溶液が稀薄で溶質イオンの相互作用がない場合は、活量係数=1となり、溶質の濃度と活量が同じになる。今回は、活量係数 γ は、石膏飽和水溶液の値(0.015 mol kg^{-1} の時に $\gamma=0.5$)とDebye-Huckelの法則

$$\gamma = -0.509 |z_- z_+| \sqrt{I} \quad (8-4)$$

ただし、 γ :活量係数、 I :イオン強度(石膏の場合、 $I=4m$)、

m :モル濃度 $[\text{mol kg}^{-1}]$ 、 z_- 、 z_+ :正負の荷電数

で2価の陽イオンからなる硫酸化合物において実際の γ の値との隔たりが小さくなる濃度(=0.001 mol kg^{-1})の時の値($\gamma=0.74$)との間を1次直線で補間することにより求め、表面流出水、下部排水について次式

$$\text{石膏溶液濃度}[\text{mol kg}^{-1}] = (\text{ECから求めた活量}[\text{mol kg}^{-1}]) \div \text{活量係数} \quad (8-5)$$

を用いて溶液濃度を試算した。溶液濃度がわかっている場合は、逆に計算をたどればECの値が計算できる。

純水に石膏を溶かした水溶液中の石膏濃度とこのEC-濃度関係の比較を行ったのがFig.VIII-19である。図中の黒丸が実測値で実線、破線が推定値である。水溶液中のイオン間の相互作用が少ない低濃度(0.003 mol kg⁻¹)以下では、濃度をそのまま用いて推定したECと実測値が近い値を示したが、イオン間の相互作用が相対的に大きくなってくる0.005 mol kg⁻¹以上の比較的濃い溶液では、活量を用いた方がよい推定結果を示した。

(2) ライシメータ底部からの排水のEC-測定値と計算値の比較

風乾土に石膏5t ha⁻¹与えた場合と、湿土に石膏2.5t ha⁻¹与えた場合について、ライシメータ底部からの排水中のCa²⁺イオンの濃度を原子吸光分析装置を用いて測定した(Fig.VIII-20)。イオン濃度の測定値をVIII.5.2(1)の手法でEC値に変換した結果と降雨実験中に測定したECの値を比較したのがFig.VIII-21である。降雨中にECが低い値のまま余り変化しない湿土に2.5tha⁻¹石膏を与えた場合は、実測したECと排水中のCa²⁺濃度から推定したECが良い一致を示している。一方、排水中のECが変化する風乾土に石膏を5tha⁻¹与えた場合は、ライシメータ底部からの排水発生時から実測値と推定値の間に常に0.4~0.7 dS m⁻¹(イオン量で3~5.3 meq L⁻¹)の差があった。これは、Ca²⁺以外の溶質イオンの流出を示しているものである。

(3) 石膏の収支

各降雨実験について、Ca²⁺を石膏のトレーサーとみなし、石膏の分子量(CaSO₄·2H₂O:分子量 172.2)、ECから算出したCa²⁺濃度とライシメータへの浸入量、表面流出量、下部排水量の積を用いてライシメータ表面に散布した石膏の収支を計算した(表VIII-5)。表面流出水、地表面からの浸入水の溶質量は、地表面流出水のECから算出した。ライシメータ底部からの排水中の溶質量も排水のECから計算したものである。土壌中に貯留した量は、浸入水中の溶質量とライシメータ底部からの排水中の溶質量の差である。

石膏を散布していない実験では、土壌の交換性陽イオンの構成にほとんど変化がなかった。石膏を投与した実験では、散布量、降雨時間、初期水分に関りなく

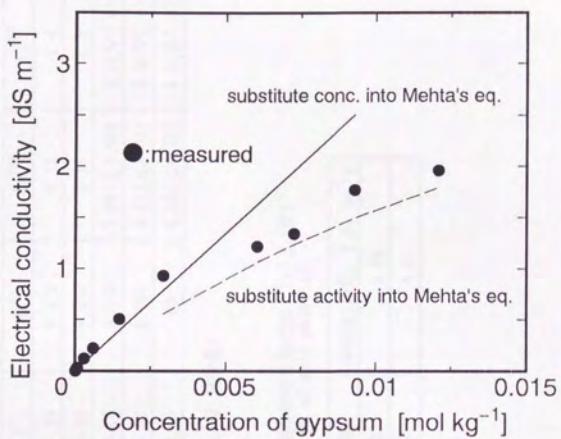


Fig. VIII - 19 Measured and estimated electrical conductivity of gypsum solution.

石膏水溶液の濃度と電気伝導度

Table VII-3 石膏投与による国頭マージの交換性陽イオン量の変化
Changes in exchangeable cation due to gypsum amendment

meq [100g乾土] ⁻¹	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Al ³⁺
降雨前	0.22	0.25	0.079	0.12	4.4
湿润 石膏無し	0.27	0.23	0.077	0.13	3.6
湿润 2.5 t ha ⁻¹	0.25	0.14	0.028	1.68(Δ1.56)	2.8(▽1.6)
湿润 5 t ha ⁻¹	0.30	0.20	0.031	2.21(Δ2.09)	3.0(▽1.4)
風乾 2.5 t ha ⁻¹	0.31	0.16	ND	2.40(Δ2.28)	2.6(Δ1.8)

*()内は、降雨前の値との差の絶対値 (Δ:増加量、▽:減少量)

Table VII-4 降雨前後の土壌のpH (1:2.5法)
pH of soil material

	降雨前	降雨後(風乾、2.5t ha ⁻¹)
pH(KCl)	3.65	3.69
pH(H ₂ O)	4.25	4.21

Table VII-5 降雨実験中に土壌に吸着された石膏量
Amount of gypsum adsorbed to soil during a rainfall

実験条件	表面流出中の 溶質量(g)	底部排水中の 溶質量(g)	浸入水中の溶 質量(g)	土壌中に貯留 した溶質量(g)	交換性 $Al^{3+}-Ca^{2+}$ の变化量から換算 した石膏吸着量 (g)
湿润 0 t ha ⁻¹ (160 min)	1.1	0.6	1.0	0.4	0.07
湿润 2.5 t ha ⁻¹ (180 min)	9.0	1.0	10.3	9.3	11.6-11.9
湿润 5 t ha ⁻¹ (240 min)	10.8	3.0	12.9	9.9	15.5-10.5
風乾 2.5 t ha ⁻¹ (240 min)	1.9	2.8	12.1	9.3	16.9-13.3

Table VII-6 pHによる水溶液中のAlイオンの形態

No.	Alイオンの形態 \ pH	7	6.5	6	5	4	3
1	Al^{3+}	$10^{-11.34}$	$10^{-9.84}$	$10^{-8.34}$	$10^{-5.34}$	$10^{-2.34}$	$10^{0.66}$
2	$AlOH^{2+}$	$10^{-9.36}$	$10^{-8.36}$	$10^{-7.36}$	$10^{-5.36}$	$10^{-3.36}$	$10^{-1.36}$
3	$Al(OH)_4^-$	$10^{-6.91}$	$10^{-7.41}$	$10^{-7.91}$	$10^{-8.91}$	$10^{-9.91}$	$10^{-10.91}$
4	$Al_2(OH)_2^+$	$10^{-12.95}$	$10^{-12.95}$	$10^{-10.95}$	$10^{-8.95}$	$10^{-2.95}$	$10^{1.05}$
	EC	No.3:0.02	2:0.001	2:0.012	1:1.85	1:1850	-
	$\mu S\ cm^{-1}$		3:0.005	3:0.002	2:1.18	2:118	-

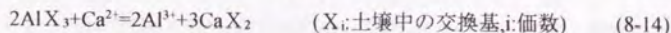
ECの行は、寄与する形態のNo.:EC値で表記

9.3~9.9g の石膏が土壤に保持された。この値は、Table 4の降雨前後の交換性Alと交換性Caの変化量から計算した石膏の吸着量(10.5~16.9g)に近い値である。吸着量は、間隙を閉塞させた石膏の分も含んでいる可能性がある。溶質の収支から算出した貯留量が吸着量よりも若干小さいが、Fig.VIII-21で示したように、土壤中に流入する石膏の量が多くなると底部排水中にCa²⁺以外のイオンが含まれるようになるため実際の貯留溶質量は、もう少し(1~2g)大きくなる。この分を考慮すると土壤中の貯留溶質量とAl-Caイオン交換量から計算した石膏吸着量はより近い値となるはずである。

(4) 石膏の施用に伴うイオン交換現象

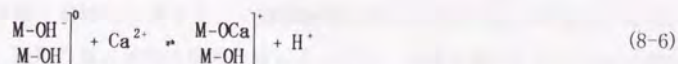
Roth and Pavan(1991)は、酸性土を石膏で改良する実験の中で、石膏投与によって土壤のpHが変化せずに分散性が増したことを報告し、その原因として Pavan et al. (1984)に報告されたような土壤の交換性Alイオンと石膏のCaイオンとのイオン交換が考えられると述べている。これらの既往の研究で提案されている、酸性土壤に石膏を与えたときに生じるイオンの交換吸着現象としては以下のようなものがある。

- ・ 交換性AlイオンとCaイオンの交換



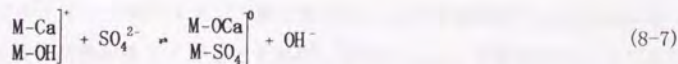
- ・ CaSO₄イオン対の土壤への吸着(高電解質濃度の場合生じると考えられる、Bolan et al. 1993, Morcano-Martinez & McBride 1989)

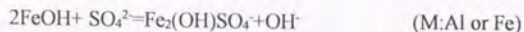
- ・ Caイオンの特異吸着(Bolan et al. 1993)



(M: Fe, Al and Si)

- ・ 硫酸イオンの吸着(SO₄²⁻の水酸基への吸着, pHを上げる方向へ働く。Bolan et al. 1993)





(8-8)

(Alva et al. 1990)

Alva et al.(1990) は、石膏を投与した土のpHについて、

1) 添加した陽イオンと粘土表面のH⁺イオンとの交換(Ca²⁺の特異吸着)がpHの低下を引き起こす

2) 粘土表面のOH基と施用した石膏中の硫酸イオンとの交換によりpHが増大する。

という二つのメカニズムが競合していると考察した。さらに、Alva等の実験で使用した濃度の石膏では、二つのメカニズムが相殺したためか、pHの変化が生じなかったが、実際の圃場のように地表にまいた石膏が溶けて高濃度で浸入していくような状況では、pHの変化が生じることは有り得ると述べている。

今回の実験では、Al-Caイオン交換が生じたことは確認された(Table VIII-3)。さらに、石膏を多く与えた場合には、降雨150分以降でライシメータ底部からの排水にpHの低下が観察されたことから、おそらくAl-Caイオン交換以外に、今まで提案されてきたようなH⁺やOH⁻のやりとりを行う、Caイオンの特異吸着、硫酸イオンの吸着といった反応が与えた石膏の量に応じて生じているものと考えられる。石膏5t ha⁻¹ 施用時には、ライシメータ底部からの排水中にCa²⁺以外の陽イオンが少なからず含まれていること(Fig. VIII-21)からも複数の反応の介在が予想される。

一般に石膏は炭酸Caと異なり、pH調節機能がないと考えられているが、今回の結果から、施用の量と対象土壌の性質によっては、石膏の施用によってpHの矯正も期待できる可能性が示唆された。

VIII.5.4 水溶液中のアルミニウムの挙動

これまで述べてきたように、国頭マージに石膏を施用した場合に、降雨中にCaイオンとAlイオンの間でイオン交換が生じることが実験結果から明らかになった。もしイオン交換が生じているとすれば、交換によって土壤溶液中にでてきたアルミニウムイオンが水中でどのような挙動をするかということは、現象を理解するために重要である。

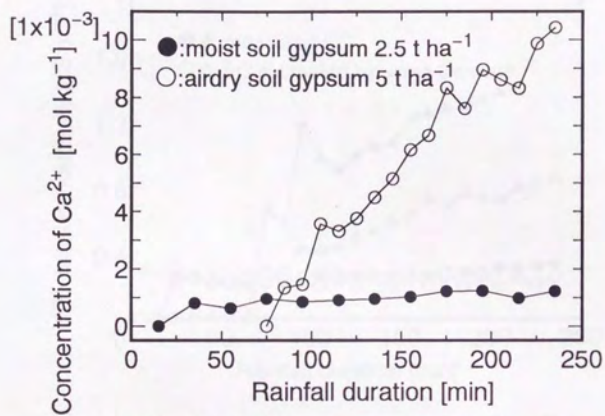


Fig. VIII-20 Ca^{2+} concentration of effluents
(Kunigami Maji)

ライシメータ底部からの排水中の Ca^{2+} イオン濃度

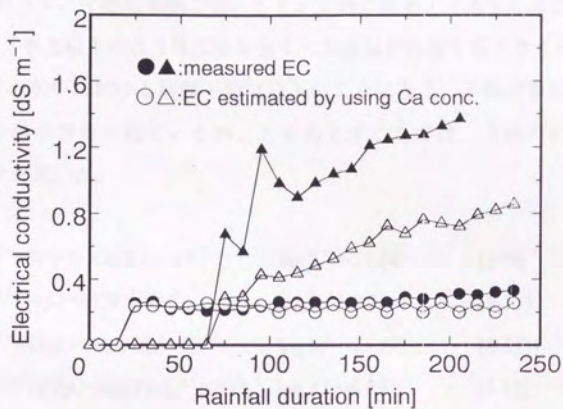
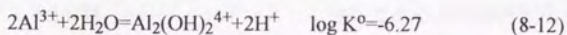
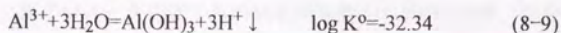


Fig.VIII-21 Electrical conductivity and Ca²⁺ concentration of effluents (Maji:▲△:5t ha⁻¹ of gypsum for air-dry soil, ●○:2.5 t ha⁻¹ of gypsum for moist soil)
ライシメータ底部からの排水の電気伝導度 (実測値と計算値)

Al³⁺イオンの単量体は、pHに依存して形態を変える。pH<4.7では、ほとんどがAl³⁺イオンとして存在し、水溶液になる。4.7<pH<6.5では、Al(OH)₂⁺として存在する。6.5<pH<8.0では、Al(OH)₃として沈殿し、8.0<pHでは、Al(OH)₄⁻として逆に陰イオンとして存在することになる。ライシメータ下部からの排水のpHは、ほとんどの場合、降雨開始後150分間程度は、pHが6から7の間であった (Fig. VIII-17)。したがって、今回の実験では、イオン交換の結果土中水中に放出されたAl³⁺イオンは、水と以下のような反応を生じて大部分が沈殿すると考えられる。

Al³⁺イオンの水中における溶解平衡は以下ようになる。平衡定数の値については、様々な値が報告されているが、とりあえずここでは、土壌の化学 (Bolt 1978)のデータを用いた。



(K⁰:平衡定数、Bolt and Bruggenwert 1978)

(8-9)より

$$[\text{Al}^{3+}] = \frac{10^{-32.34}}{10^{3(\text{pH}-14)}} [\text{mol L}^{-1}] \quad (8-10)$$

(8-10)より

$$[\text{AlOH}^{2+}] = \frac{10^{-5.02} \times [\text{Al}^{3+}]}{[\text{H}^+]} \quad (8-11)$$

(8-11)より

$$[\text{Al}(\text{OH})_4^-] = \frac{10^{-23.57} \times [\text{Al}^{3+}]}{[\text{H}^+]^4} \quad (8-12)$$

(8-12)より

$$[\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}] = \frac{10^{-6.27} \times [\text{Al}^{3+}]^2}{[\text{H}^+]^2} \quad (8-13)$$

以上の式にpHの値を代入して順々に計算を進めると、pHに応じて水溶液中のAlの様々な形態について濃度を求めることができる。その結果はTable VIII-6に示した。

Table VIII-6から、pH5以上であれば、 Al^{3+} と水の反応による生成物の大部分はイオンとして存在しないこと、すなわち沈殿してしまうことがわかる。Fig. VIII-17で示したようにライシメータ底部からの排水のpHは、ほとんどの場合pH5以上なので、ライシメータ底部からの排水中ではAlは、イオンとして存在できない、すなわちECにはほとんど寄与しないと考えることができる。実際に湿土の石膏 2.5t ha^{-1} の場合に、ライシメータ底部からの排水開始時から約100分間、10分間隔で排水を採取して原子吸光分析器で排水中のAlを測定したところ、時間経過に無関係に $0.38(\pm 0.17)\text{ mmol kg}^{-1}$ という値を示した。ここで括弧内の数字は、標準偏差である。仮にpH5としTable VIII-6から、イオンとして存在できるAlの量を算出すると、濃度にして $8.73 \times 10^{-3}\text{ mmol kg}^{-1}$ 程度になる。この値は、排水中のAl濃度よりもはるかに小さい。したがって、イオン交換の結果、浸透水中に放出された Al^{3+} イオンは、その大部分が水と反応して難溶性の水酸化Alとなって移動していることが推察される。

VIII.6 石膏の投与と国頭マージの分散性の変化

今回の実験で降雨中の地表面流出の変化を見ると、石膏を投与した方が地表面流出の発生が早くなっている。これは土壌クラストの形成、遡れば土壌の分散の促進を意味している。塩類土を主体に多くの研究で、石膏の投与により土壌の分散が抑制され、無投与の条件よりも浸入速度の低下が遅延する、または地表面流出速度の増加が遅れるという結果が得られている。

石膏が、土壌の分散を抑制するメカニズムとしては、石膏の投与による土壌(粘土)懸濁液の電解質濃度の上昇と土壌中の交換性Naと投与したCaイオンとのイオン交換という二つの効果が考えられている。前者は電解質効果、後者はイオン交換

効果と呼ばれることがある。いずれも拡散二重層理論によって説明されているものである。

電解質効果は、土壌水中でバルク若しくは、外液と呼ばれる荷電を持った粘土粒子の影響を受けない領域の電解質濃度が上昇すると、粘土粒子周囲の拡散二重層の厚さが圧縮されるため、粘土粒子相互間の距離が短くなり、粘土（土壌）の凝集が促進するものである。イオン交換効果は、粘土粒子表面における吸着陽イオンの価数によってやはり拡散二重層の厚さが変化すること、すなわち、より高価なイオンが吸着すると拡散二重層の厚さが相対的に薄くなることから粘土粒子相互間の距離が短くなり粘土の凝集が促進されると考えられている。イオン交換効果は、たとえば、塩類土壌において土壌中の Na^+ を石膏の Ca^{2+} で置換することによって、土壌の分散性を操作しているものである。

以上のような機構によって、石膏は土壌の分散を阻害し、土壌間隙の目詰まりや地表の土壌クラストの形成を妨げ、土壌の透水性を維持すると考えられてきた。

今回の実験では、土中水の濃度が高い降雨開始直後に土壌の分散が促進されていることから、与えた石膏の電解質効果は小さかったものと考えられる。残るイオン交換効果については、Table VIII-3で示したように、国頭マージの交換性 Al^{3+} は投与した石膏中の Ca^{2+} と交換する。このイオン交換は、塩類土壌の改良における $\text{Na}-\text{Ca}$ イオン交換の場合と逆に粘土粒子により低い価数の陽イオンが吸着することとみなせる。すなわち、拡散二重層理論のアナロジーから、この $\text{Al}-\text{Ca}$ イオン交換は、粘土周囲の拡散二重層を広げ、土壌の分散性を増加させ得ると考えられる。

他方、イオン交換の結果 Al^{3+} は、浸透水中へ放出される。このとき、 Al^{3+} は水と反応して難溶性の水酸化 Al を生成する(Table VIII-6)ため、この Al^{3+} も電解質効果を持たないものとみなせる。Table VIII-6と前述したライシメータ底部からの排水中の Al 濃度からも、排水中の Al の大部分は、非イオン形態で存在していることが推察できる。

一方、 Al 塩にはコロイドを凝集させる効果があるとされ、硫酸 Al 、塩化 Al 、ミョウバンなどが、汚濁水中の懸濁物を凝集させるために用いられてきた。また、水酸化 Al の析出物には、コロイドを凝集させる架橋作用があるという報告もある(田中、足立(1995)、Manahan(1994))。この見地から考えると、イオン交換の結果、土中水中に放出された Al イオンは、水と反応して水酸化 Al を形成することで、

懸濁した土粒子の再凝集や土壤構造の補強といった分散抑制効果を持つことも考えられる。

VIII-1のメスシリンダーを用いた土壤懸濁液の沈降実験では、石膏の影響は、土壤懸濁液へ投入後120分後までは分散促進効果が顕著で、その後、凝集効果が遅れて顕著になったことが観察されている。一般に、イオン交換現象は速く生じ、結晶など析出現象は時間を要するとされている。したがって、国頭マージの分散性促進の原因については、降雨実験中という短時間内のイオン交換による $Al^{3+} \rightarrow Ca^{2+}$ という吸着イオン種の変化による拡散二重層の拡大、すなわち分散促進効果が、土壤懸濁液中の電解質濃度上昇や、水酸化Alのコロイド凝集促進といった土壤分散抑制効果を上回ったため、降雨開始後速やかに土壤が分散し、地表面に土壤クラストが形成したと考えられる。もちろん、2時間、24時間といった長時間の反応になれば、Al塩に懸濁土粒子凝集効果があることは今回の実験でも確認されており、分散効果と凝集効果は時間スケールによって優位な方が発現するものとみなすことができる。

本研究では、降雨中のライシメータ底部からの排水のEC、pHの変化から、石膏の施用に起因する複数の反応が土壤中で生じていることが推察された。土壤内で生じている各反応の反応動力学や、各反応が土壤の荷電特性すなわち分散性に及ぼす影響を、より化学的な手法を用いた溶液中の元素や錯体の特定、イオンの吸着等温線の決定やイオン交換、水和等諸反応の速度の測定を行うことにより明らかにできれば、石膏の国頭マージの分散性を増大させたメカニズムはより明確になると考えられる。

VIII.7 まとめ

酸性土壤である国頭マージを供試土に石膏を施用して、降雨中の土壤クラストの形成、降雨の浸入排水、土壤流亡の変化を調べた。石膏の施用によって国頭マージは分散性を増し、クラストの形成が促進された。形成したクラストの透水性は、石膏の施用によってほとんど変化しなかった。

降雨中の地表面流出水とライシメータ底部からの排水のEC、pHの測定や降雨前後の交換性陽イオンの測定から、石膏の施用後の降雨中にAl-Caイオン交換が土壤中で生じたことが明らかになった。

石膏施用による国頭マージの分散性の変化のメカニズムの全貌は不明であるが、少なくともAl-Caイオン交換による土壌（粘土分）の荷電特性の変化が分散性を増大させたということが明らかになった。

以上述べてきたように、この研究では人工降雨を用いた室内実験を中心にしながら、湿潤地域の比較的粘性な土における土壌クラスト形成という現象について知見を得た。具体的には以下ようになる。

団粒破壊実験や土壌薄片を用いた土壌クラストの構造の観察から、クラスト形成過程を土壌の性質、水分などの初期条件、雨滴の性質を考慮して、スレーキング型と非スレーキング型の二つに整理した。スレーキング型、非スレーキング型という分類自体は、既往の研究と表現が異なるだけという印象を与えるが、この結果の重要な点は、雨滴の性質（径）も土壌の性質とともに考慮すべき要因であることを確かめたことである。この結果が一般的なものであるか、供試土特有のものであるかという点は、砂壤土、砂質土といった粒径組成の荒い土や低地の沖積土、母材の異なる試料を用いた実験により今後、検討する必要がある。

人工降雨によって形成したクラストの土壌物理性（乾燥密度、透水係数、水分特性、粒径、団粒組成）を測定し、土壌薄片の観察で得られた知見（団粒の破壊と間隙の目詰まり）が土壌物理性に反映していることを確かめた。すなわち、クラストの形成によって降雨前の土壌と比較して、大きな間隙が閉塞し、密度の高いクラストになったことが明らかになった。また、クラストを含む土層の乾燥密度、水分特性は測定例が少ない貴重なデータである。クラスト形成様式とクラストの性質の間の関係については、乾燥密度、水分特性、粒径、団粒径組成に関するより精度の高い測定法の開発や供試土の調整方法の検討から明らかにする必要がある。特に、重量法による乾燥密度の測定に限界があることが確認されたことから、試料のサイズに対してより自由度が高く、かつ精度の低下しない乾燥密度測定法の開発導入が今後の課題の一つと考えられる。

下端の境界条件の影響が地表面近傍に及ばないように長い円筒カラムを用いたクラスト形成実験ならびにクラストへの浸透実験、透水試験を行い、クラストの有無とカラム内の定常マトリックスポテンシャル分布変化との比較やクラスト下方の土層の不飽和透水係数等からクラストの性質を考察した。

山梨粘土ロームでは、地表面から7~10cmの深さまでクラスト形成の影響が及ぶのに対して、国頭マージでは、1~3cm程度であった。また、視覚的に構造の変化が確認できるのは、地表面から1cm程度であるが、視覚的には識別できない下

方の層でも間隙に目詰まりが生じ透水性に変化が起きていることを明らかにした。目詰まり層の厚さを決定する要因については、初期の間隙構造や分散の結果生じる土壤懸濁液の粒径組成等が重要と考えられる。目詰まりのメカニズムについては、これらの要因を考慮して、より単純化した系でfilteringの実験を行うことで理解が進むことと考えられる。

クラスト部の透水性は、今回の実験では、供試土の10000分の1（山梨粘土ローム）から1000分の1（国頭マーヅ）まで低下した。この低下は、従来行われてきた乾燥密度と透水性の関係から予測できる低下量よりも更に大きなものである。この結果から、クラストの形成は、単なる圧縮や圧密ではなく土壤の変貌と見なせるような現象であることがわかる。

小型ライシメータを用いた室内人工降雨実験でクラスト形成の降水の浸入、地表面流出に及ぼす影響を明らかにした。とくに、地表面流出、ライシメータ低部からの排水ならびに土層内のマトリックポテンシャルの時間変化から、地表面近傍のクラストの形成によって、降雨強度が供試土の飽和透水係数よりも小さいにも関わらず、雨水が地表面流出として流出するというを観察以外の方法で実証した。

クラストの形成に伴う小型ライシメータからの流亡土量の変化を調べ、クラストの形成に伴い、土壤が流亡しにくくなる場合と土壤の流亡が促進される場合の二つを整理した。ライシメータにおける土壤流亡実験では、地表面流出による地表面の切削に斜面長に関してスケール効果があるため、今回の結果を現場の現象に適用するためには、2m以上の斜面長を持つライシメータを用いた実験で、支配的な要因を特定する必要がある。また、試作した土壤面貫入抵抗による土壤流亡予測の可能性を示した。今後は、貫入方法の規格化、データの蓄積を行うことでその適用可能性が評価できると考えている。

酸性土壤である国頭マーヅを供試土に酸性矯正に用いられる石膏の施用が酸性土壤の分散、クラストの形成、土壤流亡に及ぼす影響を調べ、そのメカニズムを考察した。石膏の施用によって国頭マーヅの分散性が少なくとも一時的に増すことを、土粒子の沈降実験や土壤クラストの構造、降雨開始後のクラスト形成の様子から実証した。この結果は、石膏の施用に関する既往の多くの研究結果と異なるものである。さらに、この分散性の増加を石膏中のCaイオンと国頭マーヅの交換性Alイオンの間で生じるイオン交換と土壤の吸着イオンの違いによる分散性の変化

から言及した。土壌溶液中の Al^{3+} イオンの挙動自体がまだ未解明であるため、分散性の変化の詳細には不明な点もあるが、今後、排出液中の Al^{3+} イオン濃度の変化の測定や土壌溶液中のAlの存在形態、Al-Ca吸着等温線や石膏中の SO_4^{2-} の寄与などについての解明を進めていくことで、国頭マージ等の酸性土壌における石膏の影響が明らかになるものと考えられる。

おわりに

本研究で扱った表層クラストの問題は、古くて新しい問題である。1958年代から連綿と主としてクラストの影響に関する研究が行われてきた。しかし、クラストの問題が主として降雨中のみに限定されることやクラストの小さなサイズに対応できるような測定技術が不足していたことなどが原因となってクラストそのものについての研究は、手つかずに残されていたと言っても過言ではない。さらには、土壌の分散というきわめて複雑な現象がクラストの問題において支配的に振る舞っていることもクラストの研究を難しくしている一因と考えられる。

近年、コンピュータの進歩とともに数多くの数値計算コードが生み出され、実験や測定が困難な現象について適用されている。土壌に関連する分野でも、土壌中の物質やエネルギーの移動、イオン交換平衡について多くのシミュレーションコードが提供されて成果を上げている。これらの数値計算プログラムの多くは、いわゆる物理モデルである。物理モデルでは、パラメータが結果を左右する重要な要素となる。土壌内の物質移動では、水分特性、飽和・不飽和透水係数や溶質や熱の移動係数などがパラメータとなる。このパラメータをいかに合理的に、正確に与えるかということが数値計算で現象を再現できるか否かの要点となるが、クラストに関しては、これらのパラメータの測定例がほとんど無いのが現状である。実測したパラメータがない場合は、何らかの方法で論理的に推定して論を進めるのが定石であるが、クラストに関しては、行った推定が正しいのか誤っているのか全くわからない「闇夜の散歩」のような状態にある。本研究で、実験的にクラスト形成に伴う土壌の物理性の測定を試みた背景の一つとして、このような現実の問題がある。結果としては、飽和透水係数一つをとっても現在用いられているような推定方法ではクラスト形成に伴う透水性の変化が正確に表現できないことが明らかになった。したがって、クラスト形成に由来する土壌物理性の変化のより良い定式化が、今後の課題となる。

本研究では実験的にクラストの性質、影響を解明することを主たる目的としたが、実験を進める中では、以下のような今まで注目されてこなかった、または不明であったいくつかの点についても明らかになった。

一般に、実験を行うにあたっては試料の特性を十分考慮して実験を設計することが重要と言われているが、一つの側面に注目すると他の要因をなおざりにしたり、捨象したりしてしまうことがしばしばある。一例を挙げると、本研究では、深さ10cmのライシメータと土層厚さ60cmの円筒カラムの二種類の土壤容器を用いて実験を行った。既往の研究では、室内実験では、深さ5cm~20cmのライシメータを用いた実験が大部分で、より深いものや長い円筒カラムを用いた実験は少ない。一方、土壌には、空気侵入値で特徴付けられるような水分保持機能がある。実験対象土層の厚さが土壌の空気侵入値の水頭表示よりも薄い場合には、容器底や土層下端の影響が土層表面にまで及ぶことが予想される。空気侵入値は土壌によって異なるが、水頭で5~40cm程度であることが多い。このような場合、5~20cmという薄い土層で実験を行うと現場の圃場の条件と異なる以上に、容器下端の影響のもとで現場の水分状況とは全く異なる条件下におけるクラストの形成を観察してしまうことになりかねない。本研究では、この点を考慮して異なる厚さの土層について実験を行い、考察した。形成までの降雨量やクラストの透水性から、今回用いた供試土については、クラストの形成が地表付近に限定され、10cm程度あればそれ以上の土層の厚さはそれほど大きな影響を持たないことが明らかになった。このような点一つについても今までの研究では、検討されていないものである。

クラストは、多くの場合、降雨時に地表面流出を促進し、土中水の涵養を阻害し、水食を増すという営農の障害となる。したがって、可能な限りその形成を防ぎたいという要請がある。対策を立てるためには、形成のメカニズムを明らかにしなければならないが、土壌の分散、団粒の破壊といった複雑な現象を含むためにクラストの形成メカニズムの解明はまだ緒についたばかりといえる。今まで、土壌の初期水分や降雨エネルギーとクラストの形成について検討が行われてきたが、本研究では、降雨の際に雨滴径にも変動がある点に注目し、雨滴径と団粒径の相対的な関係がクラストの形成に影響を与えることを示した。このことから、例えば、ロータリー耕で土を細かく砕いてしまうとクラストが形成しやすくなることがわかる。したがって、可能であれば、不耕起やプラウ耕程度

で大きな土壤構造を維持した方がクラスト形成防止には効果的である。このことは、不耕起栽培の研究から経験的に得られている傾向と一致している。

クラスト形成において地表面から下方への土粒子の移動があるかどうかという点が長い間論点になってきた。今回の結果から、今回用いたような構造の発達した粘性土の場合には、土層内への分散土粒子の移動があることが実証された。このことから、クラスト形成土層を元通りに復帰させるためには、地表のクラストの破壊だけではなくクラスト形成の影響を受けている下層の破壊も必要であることがいえる。

酸性土壤におけるCa塩としての石膏の影響についても若干の知見を得ることが出来た。一般に、炭酸Caと異なり石膏には、pH矯正効果は無いと考えられている。しかしながら、いくつかの研究では、石膏の施用とともに原因不明のpHの変化が生じたという報告がされてきた。本研究の結果から、pHの変化は、石膏の施用量の多少によって生じることが明らかになった。すなわち、石膏の施用量が多いときにpHの低下が生じた。また、石膏の施用が土壤の分散性を増してクラストの形成を助長することを実験的に明らかにした。このことは、酸性土の改良にあたってCa塩の施用を行う際に十分考慮すべき結果と考えている。土壤中で生じている反応を含めてこのpH低下、分散性増大の詳細なメカニズムについては、本研究の中では明らかにされなかったので、今後の課題としたい。

本研究は、表層クラストの形成とその影響というどちらかといえば問題解決型の研究課題を比較的、理学的な課題（知見）追求型の姿勢で調べたものである。しかし、その成果は、石膏の影響など現場においても検討の価値のある重要なものが得られたと考えている。また、研究を進める中で、表題にあるような土層の物理性と受食性というどちらかといえば物理的な領域を越え、土壤中における石膏(硫酸Ca)と土との反応という土壤化学的な部分まで手を広げざるを得なくなった。このような境界領域の研究というものは、今後ますます重要になると考えられる。このような機会を著者に強いてくれたという点でも「降雨によるクラスト形成が土壤の物理性・受食性に及ぼす影響に関する研究」は重要な研究であると考えている。

参考文献

- Agassi M., J. Morin, and I. Shainberg, Effect of raindrop impact energy and water salinity on infiltration rates of sodic soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 186-190, 1985
- Ahuja L.R., Modeling infiltration into crusted soils by the Green-Ampt approach, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 412-418, 1983
- Alve A.K., M.E. Sumner, and W.P. Miller, Reactions of gypsum or phosphogypsum in highly weathered acid subsoils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 993-998, 1990
- Aly S. M., and J. Letey, The effect of two polymers and water qualities on dry cohesive strength of three soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 255-259, 1989
- Atkins P.W. 物理化学 第2版(千原、中村訳)、東京化学同人, 1982
- Baumhardt R.L., M.J.M. Romkens, F.D. Whisler, and J.Y. Parlange, Modeling infiltration into a sealing soil, *Water Res. Res.*, 26, 2497-2505, 1990
- Ben-Hur M., I. Shainberg, and R. Keren, Effect of sodium polymetaphosphate on soil crust formation and runoff/rain relations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1314-1318, 1986
- Ben-Hur M., I. Shainberg, D. Bakker, and R. Keren, Effect of soil texture and CaCO₃ content on water infiltration in crusted soil as related to water salinity, *Irrigation Sci.*, 6, 281-294, 1985
- Ben-Hur M., I. Shainberg, R. Keren, and M. Gal, Effect of water quality and drying on soil crust properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 191-196, 1985
- Ben-Hur M., I. Shainberg, and J. Morin, Variability of infiltration in a field with surface-sealed soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 1299-1302, 1987
- Bertrand A.R. and Kamil Sor, The effects of rainfall intensity on soil structure and migration of colloidal material in soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26, 297-300, 1962
- Bissonnais Y. Le, and M.J. Singer, Crusting, runoff, and erosion response to soil water content and successive rainfalls, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1898-1903, 1992
- Bissonnais Y. Le, and M.J. Singer, Seal formation, runoff, and interrill erosion from seventeen California soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 224-229, 1993
- Bissonnais Y. Le, and A. Bruand, Relationship between aggregate breakdown, crust structure and interrill erosion, Sealing, crusting, and hardsetting soils. *Australian Soc. Soil Sci.*, 133-138, 1995
- Bolan N.S., J.K. Syers, and M.E. Sumner, Calcium-induced sulfate adsorption by soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 691-696, 1993
- Bolt G.H., and M.G.M. Bruggenwert, 土壤の化学 第6章(岩田、三輪、井上、陽共訳), 学会出版センター, 125-135, 1978
- Bouma J., F.D. Hole, and C.R. Amerman, Field measurement of unsaturated hydraulic conductivity by infiltration through artificial crusts, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35, 362-364, 1971
- Bradford J.M., The penetration resistance in a soil with well-defined structural units, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 601-606, 1980
- Bradford J.M., Penetrability, Method of soil analysis chap. 19, 463-477, 1985
- Bradford J.M., J.E. Ferris, and P.A. Remley, Interrill soil erosion processes: Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 1566-1571, 1987
- Bradford J.M., J.E. Ferris, and P.A. Remley, Interrill soil erosion processes: I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 1566-1571, 1987

- Bradford J.M. and C. Huang, Mechanisms of crust formation: Physical components, Soil Crusting Chemical and Physical Processes. Lewis Publishers., 55-72, 1992
- Bresler E., and W. D. Kemper, Soil water evaporation as affected by wetting methods and crust formation, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 34, 3-8, 1970
- Bresson L.M., and L. Cadot, Illuviation and structural crust formation on loamy temperate soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 56, 1565-1570, 1992
- Bryan R.B., and J. Poesen, Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development, Earth Surf. Processes, 14, 211-231, 1989
- Campbell G.S., Soil Physics with Basic Chapter 5 and 6, Elsevier Publishers., 1985
- Cassel D.K., H.D. Bowen, and L.A. Nelson, An evaluation of mechanical impedance for three tillage treatments of Norfolk sandy loam, Soil Sci. Soc. Am. J., 42, 116-120, 1978
- Chen Y., J. Tarchitzky, J. Brouwer, J. Morin, and A. Banin, Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation, Soil Sci., 1301, 49-55, 1980
- Chiang S.C., D.E. Radcliffe, and W.P. Miller, Hydraulic properties of surface seals in Georgia soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 1418-1426, 1993
- Chiang S.C., L.T. West, D.E. Radcliffe, Morphological properties of surface seals in Georgia soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 58, 901-910, 1994
- Cruse R.M., and W.E. Larson, Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact, Soil Sci. Soc. Am. J., 41, 777-781, 1977
- Epema G.E., and H.Th. Riezebos, Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain, Catena supplement, 4, 2-17, 1983
- Evans D.D. and S.W. Boul, Micromorphological study of soil crusts, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 32, 19-22, 1968
- Ewing R.P., and S.C. Gupta, Pore-scale network modeling of compaction and filtration during surface sealing, Soil Sci. Soc. Am. J., 58, 712-720, 1994
- Falayi O., and J. Bouma, Relationship between the hydraulic conductance of surface crusts and soil management in a Typic Hapludalf, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39, 957-963, 1975
- Farres P., The role of time and aggregate size in the crusting process, Earth Surf. Processes, 3, 243-254, 1978
- Folorunso O.A., C.E. Puente, D.E. Rolston, and J.E. Pinzon, Statistical and fractal evaluation of the spatial characteristics of soil surface strength, Soil Sci. Soc. Am. J., 58, 284-294, 1994
- Gal M., L. Arcan, I. Shainberg, and R. Keren, Effect of exchangeable sodium and phosphogypsum on crust structure-Scanning electron microscope observations, Soil Sci. Soc. Am. J., 48, 872-878, 1984
- Gardner W.R., Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table, Soil Sci., 85, 228-232, 1958
- Gimenez D., C. Dirksen, R. Miedema, L.A.A.J. Eppink, and D. Schoonderbeek, Surface sealing and hydraulic conductances under varying-intensity rains, Soil Sci. Soc. Am. J., 56, 234-242, 1992
- Gollany H.T., T.E. Schumacher, P.D. Evenson, M.J. Lindstrom, and G.D. Lemme, Aggregate stability of an eroded and desurfaced Typic Argustoll, Soil Sci. Soc. Am. J., 55, 811-816, 1991
- Govers G., and Posen J.A. field scale study of surface sealing and compaction on loam and sandy loams soils, Assessment of soil surface sealing and crusting., 171-182, 1985

Green R.E., L.R.Ahuja, and S.K.Chong,Hydraulic conductivity of unsaturated soils: field,Method in soil analysis Part 1 Chap.30, 785-789, 1985

Hardy N., I. Shainberg, M.Gal, and R. Keren,The effect of water quality and storm sequence upon infiltration rate and crust formation,J. of Soil Sci.,34,665-676, 1983

Helalia A.M., J. Letey, and R.C. Graham,Crust formation and clay migration effects on infiltration rate,Soil Sci. Soc. Am. J.,52,251-255, 1988

Hillel D., and W.R. Gardner,Transient infiltration into crust-topped profiles,Soil Sci., 1092,69-76,1, 1970

Hillel D., and W.R. Gardner,Steady infiltration into crust-topped profiles,Soil Sci.,1082, 137-142, 1969

Holder C.B., and K.W. Brown,Evaluation of simulated seedling emergence through rainfall induced soil crusts,Soil Sci. Soc. Am. Proc.,38,705-710, 1974

Johnson C.B., J.V.Mannering,and W.C.Moldenhauer,Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses,Soil Sci. Soc. Am. J.,43,772-777,1979

Jury W.A., W.R.Gardner, and W.H.Gardner,Soil Physics Chap.1,John Wiley and sons N.Y., 1991

Kemper W.D., T.J. Trout, M.J. Brown, and R.C. Rosenau,Furrow erosion and water and soil management,Trans. of ASAE, 1564-1572, 1985

Kirchhof,G. and So H.B.,Soil puddling for rice production and its effect on soil structure and water percolation.,Sealing, Crusting and Hardsetting soils. Australian Soc. Soil Sci., 413-420, 1995

Kirkby, M.J.(ed.) Hill Slope Hydrology Chap.1, John wiley and Sons New York, 1978

Lents R.D., I. Shainberg, R.E. Sojka, and D.L. Carter.Preventing irrigation furrow erosion with small applications of polymers,Soil Sci. Soc. Am. J.,56, 1926-1932, 1992

Levy G. ,I.Shainberg, J. Morin,Factors affecting the stability of soil crusts in subsequent storms,Soil Sci. Soc. Am. J.,50, 196-201, 1986

Levy G.J., J. Levin, M. Gal, M. Ben-Hur, and I. Shainberg,Polymers' effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated splinkler irrigations,Soil Sci. Soc. Am. J.,56,902-907, 1992

Levy G.J., J. Levin, and I. Shainberg,Seal formation and interrill soil erosion,Soil Sci. Soc. Am. J.,58,203-209, 1994

Levy G.J., P.R.Berliner,H.M.du Plessis, and H.van der Watt,Micro topographical characteristics of artificially formed crusts,Soil Sci. Soc. Am. J.,52,784-791, 1988

Mah M.G.C., L.A. Douglas, and A.J. Ringrose-Voase,Effects of crust development and surface slope on erosion by rainfall,Soil Sci., 1541,37-43, 1992

Manahan, E. Stanley, Chap.8 in "Environmental Chemistry 6th edition", Lewis Publishers 1994

Marcano-Martinez E., and M.B. McBride,Calcium and sulfate retention by two Oxisols of the Brazilian Cerrado,Soil Sci. Soc. Am. J.,53,63-69, 1989

Mayer L.D., and D.L. McCune,Rainfall simulator for runoff plots,Agricultural Engineering., 644-648, 1958

Mehta B.K. Salt-Water movement in unsaturated soil during evaporation, Ph.D.Thesis of The University of Tokyo, 1994

McIntyre D.S.,Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact,Soil Sci.,85, 185-189, 1958

- McIntyre D.S., Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact, *Soil Sci.*, 85, 261-266, 1958
- Miller W.P., A solenoid-operated, variable intensity rainfall simulator, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 832-834, 1987
- Moldenhauer W.C. and J. Koswara, Effect of initial clod size on characteristic of splash and wash erosion, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 875-879, 1968
- Moore D.C., and M.J. Singer, Crust formation effects on soil erosion processes, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 1117-1123, 1990
- Morin J., and Y. Benyamini, Rainfall infiltration into bare soils, *Water Res. Res.*, 135, 813-817, 1977
- Morin J., D. Goldberg, and I. Seginer, A rainfall simulator with a rotating disk, *Trans. of ASAE.*, 74-77, 1967
- Morin J., R. Keren, Y. Benjamini, M. Ben-Hur, and I. Shainberg, Water infiltration as affected by soil crust and moisture profile, *Soil Sci.*, 1481, 53-59, 1989
- Morin J., Y. Benyamini, and A. Michaeli, The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile, *J. of Hydrology*, 52, 321-335, 1981
- Morrison M.W., L. Prunty, and J.F. Giles, Characterizing strength of soil crusts formed by simulated rainfall, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 427-431, 1985
- Mualem Y., S. Assouline, and H. Rohdenburg, Rainfall induced soil seal: (A), (B), (C), *Catena*, 17, pp. 185-218, 289-303 1990
- Mualen Y., and S. Assouline, Modeling rainfall runoff relationship for bare soils affected by surface sealing, *Catena Supplement*, 19, 91-99, 1991
- Mualen Y. and S. Assouline, Modeling soil seal as a nonuniform layer, *Water Res. Res.*, 2510, 2101-2108, 1989
- Mutchler C.K., C.E. Murphree, and K.C. McGregor, Laboratory and field plots for soil erosion studies, *Soil erosion research methods chap. 2.*, 9-38, 1988
- Nadler A., M. Magaritz, and L. Leib, PAM application techniques and mobility in soil, *Soil Sci.*, 1584, 249-254, 1994
- Nishimura, T., M. Nakano, and T. Miyazaki, Effects of surface crust formation on soil hydrological processes, *Catena Supplement*, 24, 17-28, 1993
- Nishimura T., M. Nakano, and T. Miyazaki, Effects of initial water content on formation and properties of a surface crust of the maaji soil, Sealing, Crusting, and Hardsetting soils. *Australian Soc. Soil Sci.*, 151-155, 1995
- Noble A.D., M.E. Sumner, and A.K. Alva, The pH dependency of aluminum phytotoxicity alleviation by calcium sulfate, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1398-1402, 1988
- Onofriok O., & M.J. Singer, Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 1137-1143, 1984
- Pavan M.A., F.T. Bingham, and P.F. Pratt, Redistribution of exchangeable Calcium, Magnesium, and Aluminum following lime or gypsum applications to a Brazil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 33-38, 1984
- Posen J., Rainwash experiments on the erodibility of loose sediments, *Earth surface Process and land forms*, 6, 285-307, 1981

- Radcliff D.E., G.Manor, R.L.Clark, L.T.West, G.W.Langdale, and R.R.Bruce, Effect of traffic and In-Row chiseling on mechanical impedance, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 1197-1201, 1989
- Rasihah V., B.D. Kay, & T. Martin, Variation of structural stability with water content: influence of selected soil properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1604-1609, 1992
- Reichert J.M., L.D. Norton and C. Huang, Sealing, amendment, and rain intensity effects on erosion of high-clay soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58, 1199-1205, 1994
- Remley P.A. and J.M. Bradford, Relationship of soil crust morphology to inter-rill erosion parameters, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 1215-1221, 1989
- Riezobos H.Th. and E. Seyhan, Essential conditions of rainfall simulation for laboratory water erosion experiments, *Earth surface processes*, 2, 185-190, 1977
- Rolston D.E., M.N.A. Bedaiwy, and D.T. Louie, Micropenetrometer for in situ measurement of soil surface strength, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 481-485, 1991
- Romkens M.J.M, S.N. Prasad, and J.Y. Parlange, Surface seal development in relation to rainstorm intensity, *Catena Supplement*, 17, 1-11, 1990
- Romkens M.J.M, S.N. Prasad, and Whisler F.D. Surface sealing and infiltration, in "Process studies in Hill Slope Hydrology" Ed. M.G. Anderson and T.R. Burt, John Wiley and Sons, N.Y. 1990
- Roth C.H. and M.A. Pavan, Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol, *Geoderma*, 48, 351-361, 1991
- Saleh A., Soil aggregate and crust destiny prediction, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 524-526, 1993
- Segeren A.G., and T.J. Trout, Hydraulic resistance of soil surface seals in irrigated furrows, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 640-646, 1991
- Seginer I., and J. Morin, A model of surface crusting and infiltration of bare soils, *Water Res. Res.*, 62, 629-633, 1970
- Shainberg, I., R. Keren and H. Frenkel, Response of sodic soils to gypsum and calcium chloride application, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 113-117, 1982
- Shainberg I., The effect of exchangeable sodium and electrolyte concentration on crust formation, *Advan. Soil Sci.*, 1, 101-122, 1985
- Shainberg I., and G.J. Levy, Organic polymers and soil sealing in cultivated soils, *Soil Sci.*, 158 267-273, 1994
- Shainberg I., M.E. Sumner, W.P. Miller, M.P.W. Farina, M.A. Pavan, and M.V. Fey, Use of gypsum on soils: a review, *Advances in soil Science*, 9, 1-111, 1989
- Sharma P.P., and S.C. Gupta, Sand detachment by single raindrops of varying kinetic energy and momentum, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 1005-1010, 1989
- Sharma P.P., C.J. Gantzer, and G.R. Blake, Hydraulic gradients across simulated rain-formed soil surface seals, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1031-1034, 1981
- Singer M.J., P. Janitzky and J. Blackard, The influence of exchangeable sodium percentage on soil erodibility, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 117-121, 1982
- Sparks D.L. Chap.9 in *Environmental Soil Chemistry*, Academic Press, p.209-211, 1995 California USA
- Sumner M.E., Preface in *Soil Crusting, Soil Crusting Chemical and Physical Processes*. Lewis Publishers., 1992

Tackett J.L. and R.W. Perason, Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall, *Soil Sci.*, 996, 407-412, 1965

Tanaka, U., and K. Kyuma, Quantification of morphological characteristics of crust by thin section-image analyzing method (TS-IA method), *Soil Sci. Plant Nutr.*, 382, 369-373, 1992

Tanaka, U., Y. Yokoi, and K. Kyuma, Morphological characteristics of soil surface crusts formed under simulated rainfall, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 384, 655-664, 1992

Tanaka U. and K. Kyuma, Evaluation of crusting susceptibility and soil properties affecting it, Sealing, Crusting, and Hardsetting soils. *Australian Soc. Soil Sci.*, 493-496, 1995

Tarchitzky J., A. Banin, J. Morin, and Y. Chen, Nature, formation and effects of soil crusts formed by water drop impact, *Geoderma*, 33, 135-155, 1984

Valentin C., and A. Casanova, Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1667-1673, 1992

van Genuchten M.Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898 1980

van der Watt, H.v.H. and C. Valentin, Soil crusting: African view, *Soil crusting: Chemical and Physical processes.* Lewis Publishers, Florida, 301-330, 1992

van Es H.M., D.K. Cassel, and R.B. Daniels, Infiltration variability and Correlations with surface soil properties for an eroded hapludult, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 386-392, 1991

Van Olphen, H., *An Introduction to Clay Colloid Chemistry* 2nd edition, John Wiley and Sons, N.Y. 1977

Warrington D., I. Shainberg, M. Agassi, and J. Morin, Slope and phosphogypsum's effects of runoff and erosion, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 1201-1205, 1989

West, L.T., S.C. Chiang, and L.D. Norton, The morphology of surface crust, *Soil crusting: Physical and Chemical Processes.* Lewis Publishers, 73-91, 1992

芦田和男、田中健二、粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂機構に関する研究、*京大防災研年報*, 17, 571-584, 1974

岩間憲治、渡辺紹裕、堀野治彦、丸山利輔、軟X線土壌孔隙ステレオ画像の三次元表示(4)、*農業土木学会大会講演要旨集*, 608-609, 1995

吉永安俊、翁長謙良、沖繩国頭マージの造成農地における浮遊土砂流出について、*農業土木学会論文集*, 168, 105-110, 1993

宮崎 毅、西村 拓、非相似形多孔質モデルを用いた土壌のスケーリング手法、*農業土木学会論文集*, 174, 41-48, 1994

坂西研二、早瀬吉雄、マサ土裸地面の降雨流出におけるクラストの影響に関する実験的研究、*農業土木学会論文集*, 152, 47-53, 1991

三原義秋、雨滴と土壌侵蝕、*農業技術研究所報告*, 1-2-53, 1951

西村 拓、中野政詩、宮崎 毅、室内人工降雨装置による土壌クラスト形成と侵食との関連性、*農業土木学会論文集*, 146, 101-107, 1990

西村 拓、中野政詩、宮崎 毅、クラスト形成土層における水の定常浸透と層序特性について、*農業土木学会論文集*, 167, 29-35, 1993

この論文は、東京大学大学院農学系研究科修士課程時代から同博士課程、東京大学農学部助手の現在に至るまで、約8年間行ってきた研究をまとめたものです。この間、多くの方々からご指導、ご援助、そして激励を戴きました。

東京大学農学部農業地水学研究室の中野政詩教授には、学部時代の卒業論文の時から数えて10年間という長い間、指導教官として多くのことを教えていただきました。研究者としてあるべき姿、研究活動のおもしろさなど戴いた多くの言葉を咀嚼し、今後に生かしていかなければならないと感じています。また、よく言えば好奇心旺盛、言い換えれば気の多い私を時にはおだて、時には厳しく導いていただいたおかげで、ともすれば発散しがちなこの研究を、曲がりなりにもこのようにまとめることができました。ここに、深くお礼を申し上げたいと思います。

同研究室の宮崎 毅助教授は、修士課程1年時にこの研究テーマを選んだ直後に農業土木試験場（現農業工学研究所）より農業地水学研究室に移動してこれ、テーマを探し出した本人よりも詳しく、本研究の（当時の）状況や意義、背景を教えてくださいました。五里霧中の中で、院生がつかない研究を始めるにあたって、「もしかしてこのテーマで行けるかな？」という印象を持たれたことが、しばらくの間は、研究を進めるにあたり、強い心の支えになりました。宮崎助教授が地水研に来た当初に聞かされた、「自分がやっている研究、始めようとしている研究は、何故か、必ず同じ時期に誰かが取り組んでいるものである」という言葉が本当であることを最近身にしみて感じています。塩沢 昌氏（1995年5月まで同研究室助手、現筑波大学助教授）は、私の博士課程院生時から助手になって以降、農学部4号館が取り壊されるまでの間、同じ部屋で楽しく過ごさせていただきました。特に、塩沢氏の作成した「研究者のためのデータ処理、解析システム」"MYSYSTEM"と"GR-98（その後発展改称して現 MYLOG-X）"を、実験によるデータ収集ならびにその解析において縦横無尽に活用させていただきました。開発者が隣にいるのを強みに、忙しい中、新しい機能の注文までさせていただいて本当にありがとうございました。また、塩沢氏の普遍的な論理性が何よりも優先するという思想は、いい加減になりがちな私にとって常に良い叱咤激励となりました。農業地水学研究室の井本博美技術官は、この研究を始めるにあたって、実験方法や実験装置の設計にあたって相談にのっていただいただけではなく、豊富な実験経験を元に現在に至るまで、実験の問題点、改良点などを日常的に指摘し

ていただきました。年々より良い実験になっていったのは、井本技術官によるところが大きかったと思います。さらに、本論文をまとめるにあたって、農業地水学研究室の教職員の方々には、様々な配慮を戴きました。ここにお礼申し上げます。

取出伸夫氏（現佐賀大学助教授）、足立泰久氏（現筑波大学助手）、佐藤泰一郎氏（現高知大学助手）には、諸氏の大学院生当時から現在に至るまで、院生ゼミなどを通して、研究者を志す若者の持つべき姿勢を学ばせていただきました。自分がその域に達しているかは定かではありませんが、「適当にお茶を濁さず、外に目を向け常に上をめざす」ということを心に命じて今後も頑張っていきたいと思えます。特に取出氏は、学術振興会特別研究員、東京大学学術奨励金、科学技術庁特別研究員など様々な制度の活用や海外留学など多くのことについて先達となっておられました。溝口 勝氏（三重大学助教授）には、会う機会がある度に色々な助言を戴きました。近年落ちついてきてしまったのが気がかりです。

岩田進午氏（茨城大学教授）、中石克也氏（茨城大学助手）、石黒宗秀氏、安中武幸氏、原口暢朗氏（いずれも農業工学研究所）、長谷川周一氏（農業環境技術研究所）諸氏には、筑波の土壌物理ゼミにおいて発表の機会を戴きました。土壌物理ゼミにおける質問、意見はその後の研究の進め方に大変参考になりました。ここにお礼申し上げます。

琉球大学の翁長謙良教授、吉永安俊助教授、酒井一人助手、沖縄県庁農林水産部北部農林事務所の皆様ならびに山梨県農業試験場（当時）の渡辺 実氏には、採土に当たってご尽力戴きました。

和田信一郎氏（九州大学教授）には、国頭マージの石膏に対する反応に対して貴重な示唆をいただきました。イリオモテヤマネコかヤンバルクイナかと揶揄されるほど少ない日本国内における土壌クラスト研究者の片割れである田中 樹氏（京都大学助手）には、フィールド研究に強いという立場から様々な意見をいただきました。

農業地水学研究室の後輩にあたる増田 順氏（現NHK）には、在学中幾たびとなく真剣な無駄話、議論につきあって戴きました。自分には無い柔軟な発想は、時間がたつと貴重に思えてくるものであります。前村庸之氏、花山 奨氏、ZhuDunyao氏、B.K.Mehta氏（現日本工営（株））ら博士課程の院生をはじめ地水研の院生の方々には、それぞれ異なるバックグラウンドからの意見を戴きました。また特に、Mehta氏には、英語を使う機会を矯正してくれたという点でも感謝しなければならないと思えます。

農業地水学研究室卒業生の石川英一氏、松本 勉氏、黒田武史氏には、卒業論文研究の一貫として本論文内の貴重なデータの収集に協力を戴きました。この場を借りてお礼申し上げます。

農業土木学会学術基金の援助を受けて参加した「第2回クラストに関する国際会議、於オーストラリア(1994)」では、貴重な情報や人間関係を得ることができました。ここに関係諸氏にお礼申し上げたいと思います。

大学院に入学して、圃場に関連した現象を扱いたいということから始まり、土壌侵食関連のテーマを考えるという課題をもらったものの、研究の大勢である経験的、統計的手法(USLE)にはどうもはなじめず、もう少し物理的な側面から侵食について調べてみたいという気持ちを抱いて、この研究にとりかかりました。自分でテーマとして選んだものの、最初の3~4年は常に、自分自身でも、こんなもので研究テーマになるのかという疑問につきまといわれ続けてきました。とくに、土壌の分散やコンパクション、目詰まりといった複雑怪奇な現象を相手にしているだけに、もっと"きれいな研究テーマ"をどうして選ばなかったのかと後悔したことも度々ありましたが、最近やっと嘔みごたえのある良いテーマだと思えるようになってきました。今回、ここでお礼を申しあげた他にも多くの方々の協力のもとに、このように今までの成果をまとめることができました。しかし、研究そのものとしては、まとめるどころかやっとならぬところとも考えられます。今まで、周囲の方々にいただいてきたものを無にせず、研究をさらに一歩でも進めることが出来るよう今後とも精進して行きたいと思います。

1996年2月

西村 拓

降雨による表層クラストの形成が土層の物理性・受食性に及ぼす影響に関する研究

東京大学 農学部農業工学科 農業地水学研究室 西村 拓

1. はじめに

降雨中には、雨滴の作用や地表面流去水の作用で表層土壤に構造の変化が生じることが知られている。その結果形成した土層は一般に、表層クラストまたは土壤クラストと呼ばれる。クラスト形成による降雨浸透の阻害は、降水量の少ない乾燥地・半乾燥地では、土中への水の涵養を妨げ、農耕の成立を脅かす大きな問題となる。また、降雨中の土壤流亡が地表面流出の発生とともに開始することから、水食の予測、対策にあたってクラスト形成による表層土壤の透水性の変化の把握は重要な課題となる。しかし、地表面のごく薄い土層における土壤の変化であるということや降雨中に形成して大きな影響を及ぼす割には降雨後に持続性がない（耕作や動物の踏圧、乾燥収縮で壊れてしまう）ためクラストの性質や形成のメカニズムには不明な点が依然として多い。

2. 既往の研究

クラストの研究は、主に浸入に及ぼす影響を対象として行われてきた。McIntyre (1958), Shainberg (1985), Bradford (1987), Moore & Singer (1989), Bissonais (1992) など多くの研究者がクラスト形成にともなう水の浸入速度や地表面流出速度の変化を測定してきた。

クラストは、地表面の土壤が分散して形成すると考えられているが、土壤がどのように分散するか、また分散した土壤がどのようにクラストを構成するかという点はまだよくわかっていない。Van der Watt & Valentin (1992) や West ら (1992) 等は、土壤薄片を用いたクラストの形態分類から、主として雨滴の影響で形成する構造クラストと侵食された土壤の堆積によって形成する堆積クラスト（侵食クラスト）の二つに大別されると報告している。堆積クラストは、流亡土砂の分級、再堆積と見ることができる。一方、構造クラストは、形成のメカニズムについてわからない部分が多い。たとえば、McIntyre (1958) は、地表の分散土粒子は、土層へ流入し間隙を閉塞してクラストを形成するという考えを提示したが、Chen ら (1980) は、走査型電子顕微鏡を用いた観察からそのような土粒子の移動はなく、分散土粒子は侵食さ

れるだけであると報告している。

土壌の分散、クラストの形成に関する各要因については、団粒径(Farres, 1978)、初期水分(Bresson&Cadot(1992)、Chiangら(1994))、降雨の性質(Morin et al. 1981)などが報告されているが、各要因の相互作用については整理されていない。

表層クラストの物理性は、降水の利用と水食(透水性)、種子の出芽阻害(乾燥密度、硬さ)等、クラストに起因する影響に関連して研究が行われてきたが、水理学的性質については、飽和透水係数の変化以外は研究が進んでいない。

3. 本研究の目的

本研究では、室内人工降雨装置を用いた実験を行い、湿潤地域の非塩類土壌における表層クラストの形成とその影響について整理することを目的とした。具体的には、以下の3点となる。すなわち、1)表層クラストの機能と構造について整理する、2)表層クラストの形成メカニズムを土壌、降雨の性質をともに考慮した形で明らかにする。3)石膏が酸性土壌におけるクラスト形成に及ぼす影響を明らかにする。

4. クラストの形成と降雨の浸透、地表面流出

(1) ライシメータ実験

室内人工降雨装置は自作のもので、鉄パイプで枠を組んで供試体上面から235~265cm 上方に雨滴発生装置を釣り下げた(OHP-4)。雨滴発生装置は、内径0.5mmの針、128本から構成されていて、ポンプを用いて針から水滴を噴出させる。実験に用いた降雨強度は、 $32 \pm 2.2 \text{ mmh}^{-1}$ で、タイマーを用いた電磁弁の開閉とバルブによる調節で降雨強度を調整した。さらに雨滴が一定の場所に集中しないように雨滴発生装置全体をモーターを用いて毎分20回の頻度でゆっくり揺らした。この人工降雨の滴径分布は大部分が1mm以下で、降雨エネルギーは $450 \text{ Jm}^2 \text{ hr}^{-1}$ と、同じ降雨強度の自然降雨の60~70%程度の値になる。

ライシメータは、長さ50cm幅30cm深さ10cmのアクリル製の箱で、下層に5cm厚で標準砂を詰めた上に供試土を所定の乾燥密度で5cmの厚さに詰め、ジャッキを用いて 2° から 11° の傾斜をつけて実験を行った。

ライシメータ側面には、深さ1、2、4cmの位置に各3ヶ所ポーラスカップを挿入し圧力変換器を用いて土中水の圧力を測定した。ライシメータ地表部の最下流端には、フリュームを設け、地表面流出水、地表面流出水中の流亡土砂(wash)を一定の時間間隔でサンプリングした。ライシメータ底部には排水口を設け、ここからの排水は、電子天秤とパソコンを用いて経時的に測定した。さらに、石膏の施用の影響を調べる実験では、降雨の直前に地表面に石膏を散布した後に与えた石膏の移動を知

るために、地表面流出、ライシメータ底部からの排水について電気伝導度(EC)、pHを経時的に測定した。

供試土は、山梨県甲府市近郊で採取した火山灰土(山梨粘土ローム、乾燥密度 1.0Mgm^{-3})と沖縄本島中部で採取した酸性土(国頭マージ、乾燥密度 1.15Mgm^{-3})の二つを用いた。山梨粘土ロームは、現地でクラストの形成が観察されたわい性リンゴ園の斜面の表土である。国頭マージは水食が問題となっている土壤で、本実験では造成前の林地のB層の土を使用した。母材は異なるが、いずれもCL、LiC という類似した土性を持つ。両供試土とも実験に用いた降雨強度の10倍以上という大きな透水性を持っていた。実験には、供試土の3mm篩い通過分を必要に応じて水分調整して使用した。

a) 地表面流出の変化

OHP-5は、山梨粘土ロームに降雨を与えたときの地表面流出の様子である。供試土は、降雨強度の10倍以上という非常に大きな透水性をもっていることから地表面流出が発生しないことを予想したが、実際には、降雨開始後20分で地表面流出が発生した。国頭マージについても、発生時間は異なるが同じ傾向を示した。

2回目以降の降雨時には、降雨開始直後からほぼ定常な地表面流出が生じ、雨水の大半が流出した。また、いずれの土においても降雨中、地表面流出発生時には、クラストの形成が視認された。

b) クラストの性質・乾燥密度

地表面に形成したクラストの乾燥密度の測定を行った。測定は、3mm、5mm、10mmの3種類の真鍮のリングを地表面から押し込んで不攪乱試料を採取して乾燥密度を決定した。

OHP-6は、クラスト形成に伴う各深さの土壤の乾燥密度の変化量を示したものである。図中の横棒は、各データの標準偏差で、実際の乾燥密度は、この変化量に降雨前の乾燥密度を加えたものである。

変化量に注目すると、地表面から0.5cm位の層で20~30%の増加が見られた。両供試土は似た変化を示したが、これは両供試土とも3mm篩い通過分であるために、クラスト形成に伴って閉塞を受けるような間隙構造が似ていたものと考えられる。

c) クラスト形成に伴う受食性の変化

OHP-7は、降雨中の地表面流出中の平均土砂濃度の変化を示したものである。横軸は、降雨の反復回数を、縦軸は土砂濃度を示している。

降雨中にクラストが形成していく1回目の降雨よりも降雨開始時からクラストが存在する2回目以降の降雨で土砂濃度が小さくなった。マージについては、降雨の度に平均土砂濃度が低下した。山梨粘土ロームでは、2回目以降の降雨では、各降雨においてあまり土砂濃度が変化しなかった。

今回用いたような粘性土では、クラストが形成すると地表面流出が増す一方でクラスト部の耐食性は強くなることがわかる。しかし、実際の圃場では、植生や石の陰などクラストの出来にくい弱い部分があるので、クラストが形成すると、たとえクラスト部の耐食性が高くとも、圃場内の弱い部分に地表面流出を集中し、リルやガリといった深刻な浸食のきっかけができるものと予想される。

(2) 円筒カラム実験

a) クラスト形成の影響範囲

ライシメータ実験では供試土層の厚さが薄いために、下側の境界の影響が地表付近まで及ぶ可能性がある。また、クラスト形成の影響範囲がどの程度の深さまで及ぶのかも不明である。そこで、下側の境界条件が地表近くの土層に影響を与えないような長いカラムをライシメータの代わりに用いて降雨実験を行った。

OHP-8は実験に用いたアクリル製円筒カラムの模式図である。内径8.5cmでライシメータ実験と同様に土を詰め、地表面から60cmの位置に地下水面を設定した。

実験中は、深さ0.5cmから50cmまでの位置にテンシオメータを挿入して圧力変換器を用いて降雨中の土中水のポテンシャル変化を測定した。また、降雨中は、地表面流出、カラム底部からの排水の測定も行った。

OHP-9は、雨水の浸透、地表面流出が定常になっているときのマトリックポテンシャル分布で、上が山梨粘土ローム、下が国頭マージの結果である。上の図では、白丸がクラストの無いときのポテンシャル分布で、実線が水フラックス、供試土の不飽和透水係数を用いて積分型のダルシー式で計算した定常状態のポテンシャル分布である。計算値は、測定値と良い一致を示した。

クラストが形成しているときには、ポテンシャル(●プロット)勾配の大小からクラスト形成土層は、3層に分けられた。すなわち、地表から深さ0.5cmの所まで大きなポテンシャル勾配があり、この部分がクラスト層とみなせた。その下、深さ0.5から5又は7.5cmまでは、若干緩いポテンシャル勾配を持つ層があり、ここまでの層がクラスト形成の影響を受けているものと考えられる。2番目の層をたとえば遷移層と呼ぶと、その下方の3番目の土層は、クラスト形成の影響をほとんど受けていないとみなせる。

国頭マージの風乾土に降雨を与えたときの定常状態のポテンシャル分布において

もやはり、深さ0.5cmまでの大きなポテンシャル勾配を持つクラスト層と、その下2.5cmまでの若干緩い勾配の遷移層がある。2.5cmより深い土層は、降雨前と変わらないことがポテンシャル分布からわかる。ここに示していない、他の条件における結果も同様であった。

以上の結果から、クラスト形成土層は、3層構造であるということがいえる。また、各層の厚さは土の性質によって異なると考えられる。

b) クラスト形成による土壌の水理学的性質の変化

定常時の浸透フラックス（底部からの排水フラックス）とマトリックポテンシャル勾配から地表部のクラスト層の透水係数を算出したところ、降雨前の山梨粘土ロームの 0.18cms^{-1} 、マージの $9 \times 10^{-3}\text{cms}^{-1}$ と比較してクラスト層の透水係数は、1000分の1～10000分の1という小さな値になった(OHP-10)。

OHP-11は、クラストが形成している地表面から1cmの厚さの不攪乱試料を抜き出して吸引法で測定した保水曲線で、上が山梨粘土ローム、下が国頭マージのものである。丸プロット、三角プロットはそれぞれ降雨前の試料と降雨後のクラストを含んだ試料の保水曲線を示している。図中の曲線は、Van genuchten(1980)などによって提案されている保水曲線の実験式を当てはめたものである。

クラストの形成に伴って山梨粘土ロームも国頭マージも空気浸入値が0.5～1kPa低下した。このことは、クラスト形成に伴って保水に関わる大きな間隙が閉塞して減少したことを示している。さらに、空気浸入値以下の領域で、クラスト形成土壌試料が降雨前の試料よりも高い体積含率を示すことから、このポテンシャル領域の保水をつかさどるような相対的に小さいとみなされる間隙の量がクラスト形成に伴って増えたことがわかる。

水分特性曲線の測定結果から、クラスト層では降雨前の大きな間隙が目詰まりして細かい間隙に変化していることが示された。

5. クラスト形成のメカニズム

一般に、土壌が充分乾いている場合には、水の浸潤と共にスレーキングが生じて土壌の分散が促進され、その結果表層クラストの形成が進むと言われているが、本研究では、国頭マージの風乾土の時にクラストの形成が遅れた。この結果について、団粒破壊実験とクラスト形成実験の二つの要素実験を行い考察を進めた。

(1) 団粒破壊実験

団粒破壊実験では、定量ポンプを用いて団粒が壊れるまで水滴を一滴ずつ落下、

衝突させた(OHP-12)。実験では、落下高(落下速度)を変えながら水滴径、団粒径ならびに団粒の初期水分の組み合わせ12組の条件について各組12個づつの団粒を破壊実験に供試した。ここで、moistと呼んでいる水分状態は、現場での採土時の水分状態と同程度のもので含水比にして22~25%程度である。wetは、団粒を濾紙の一端に載せ、他端から慎重に浸潤、飽和させた団粒を指す。

OHP-13に団粒破壊実験の結果を示した。横軸は、団粒が壊れるまでの水滴数から計算した積算降雨エネルギー、縦軸は、破壊した団粒の割合を示す。図中、○、□、▲がそれぞれ風乾、moist、wetという初期水分の違いを表す。

団粒径が水滴径よりも小さな場合には、団粒の崩壊は、初期水分に大きく依存した。すなわち、風乾土は、 500Jm^{-2} 程度の降雨(降雨量20~40mmに相当)で全ての団粒が崩壊したが、初期水分が増していくにつれて団粒の崩壊が少なくなり、破壊実験前に充分湿らせた団粒は、 4000Jm^{-2} (200~300mmの降雨に相当)与えても半分位しか崩壊しなかった。

団粒径が水滴径よりも大きな場合は、団粒の崩壊は、初期水分に依存しなかった。すなわち、初期水分が風乾であれ充分湿潤であれ半分程度の団粒しか壊れなかった。この結果から、ライシメータや円筒カラムで風乾土の場合にクラスト形成が遅れたのは、3mm篩い通過分の供試土の方が大部分が1mm以下の雨滴よりも相対的に大きかったことが一因と考えられる。

(2) クラスト形成実験

団粒破壊実験を参考に、同じ団粒を100CC定積サンプラーに詰めて、大小の雨滴の人工降雨を用いてクラスト形成実験を行い、クラストの構造を観察した。

OHP-14に、結果の中で典型的なものを示した。上が、風乾土で団粒径の方が雨滴径よりも大きな場合、下が団粒径が雨滴径よりも小さな場合である。

いずれの条件でもクラストが形成しているが、形成したクラストの構造に違いがみられた。すなわち、団粒径が雨滴径よりも大きな場合には、団粒からはがれるように生成した小さな破片が間隙を埋め、密集してクラストを形成したのに対して、団粒径が雨滴径よりも小さな風乾土の場合は、地表部の土壌構造が消失した。これは、団粒が雨滴よりも小さな場合には、スレーキングが生じて団粒がいわば溶けるかのように崩壊してクラストを形成したことを示している。

団粒破壊実験とクラスト形成実験から構造クラストの形成は、形成過程に着目して、スレーキング型と非スレーキング型の二つに分けられると考えられる。

スレーキング型は、土壌が溶けるように崩壊して地表面の間隙を埋めてしまうものでこれに対して非スレーキング型は、団粒が徐々に壊れ若しくは、削れて細かい

破片を生み出し、これら細かい破片が間隙を閉塞して出来ていくというものである。このように、同じ土でも形成過程が異なれば違う構造のクラストが形成し得る。

6. 石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)のクラスト形成に及ぼす影響

国頭マージの様な酸性土壌では、 Al^{3+} の植物根への生理障害を防ぐために石膏や炭酸カルシウムなどのカルシウム塩を施用する。このとき生じる土壌中の交換性 Al^{3+} とカルシウム塩の Ca^{2+} の交換は、塩類土壌での改良でよく用いられる Na^+ と Ca^{2+} の交換とは逆に粘土粒子の拡散二重層を広げて、土壌の分散性を高める可能性がある。

(1) 石膏とクラスト形成

OHP-17は、降雨直前に風乾土を詰めたライシメータ地表面に 2.5tha^{-1} 、 5tha^{-1} の石膏を散布し、室内人工降雨装置で降雨を与えたときの地表面流出発生の様子である。この石膏の量は、既往の研究を参考に決めた。縦軸が流出速度で、○、■、▲の各プロットがそれぞれ石膏の無い場合と 2.5tha^{-1} 、 5tha^{-1} の結果を示している。地表面流出の発生から石膏を散布ことによってクラストの形成が促進されたことがわかる。

クラスト形成促進の理由を考えるためにまず、形成したクラストを観察を行った。ここでは、先のクラスト形成実験と同じ条件で、石膏を散布し、クラストの構造の変化を観察した。

OHP-18で、上は6時間の降雨でもクラストが形成しなかった「湿潤な団粒大に滴径大」の降雨を与えた後の土壌薄片試料の写真で、下は同じ条件で石膏を与えた場合の薄片試料である。石膏を与えた試料では、土壌の分散が著しく、供試土の土壌構造を残さないようなスレーキング型のクラストが形成した。

(2) 石膏と国頭マージの反応

OHP-19は、降雨中の地表面流出水とライシメータ底部からの排水中のECを測定したものである。国頭マージは、ほとんどイオンを含んでいない土壌なのでECの値が降雨よりも大きくなる場合は、何らかの形で石膏の施用の影響を受けたと考えられる。

縦軸が電気伝導度、横軸が降雨時間で、●、■がそれぞれ湿土の石膏 2.5tha^{-1} 、 5tha^{-1} 、▲、◆が風乾土に 2.5tha^{-1} 、 5tha^{-1} 与えたときの結果を示す。図中、黒矢印が降雨のECを示している。

地表面流出水中のECをみると、生土の場合、地表面流出発生時に飽和溶液と同じくらいのEC(約 1.8dSm^{-1})を示し、その後も高めの値で推移した。風乾土では、地表

面流出が発生するまでの1時間に散布した石膏の多くが土中に流れ込んだため地表面流出中のECは小さくなった。

ライシメータ底部からの排水中のECをみると、風乾土の場合は、降雨初期に土層中に流れ込んだ石膏の分高いECを示した。生土の場合は、底部からの排水のECは、降雨開始後150分間の間、降雨とほぼ同じ値を示した。地表面からの降雨中の浸入水のECは地表面流出水と同程度と考えられるので0.7から1.5dSm⁻¹という高い値になる。したがって、土層中に流れ込んだ石膏はライシメータ底部からほとんど流出しなかったと推測される。

そこで、降雨中に大きなECの変化を示した風乾土に石膏5tha⁻¹与えた場合と一貫して低いECを示した生土に石膏2.5tha⁻¹与えた場合について、底部からの排水中のCa²⁺濃度を測定し、OHP-21にその結果を示した。生土に石膏2.5tha⁻¹施用した場合は、Ca²⁺濃度も低い値を示した。風乾土に石膏5tha⁻¹与えた場合は、ECの変化と一致するようなCa²⁺濃度の変化を示した。この結果から、ECの変化は、石膏のCa²⁺に起因するということさらに、地表面への石膏の散布にも関わらずライシメータ底部からの排水中のCa²⁺濃度が低いということがわかる。

さらに、降雨実験後、ライシメータ内の土壌を採取し、交換性陽イオンの測定を行った。交換性のNa⁺、K⁺、Mg²⁺は量が少なく、実験前後での変化もほとんどなかった。交換性Ca²⁺は、石膏を与えた降雨後に大きく増加(1.56~2.29meq/100g soil)し、同時に交換性Al³⁺もCa²⁺の増加とほぼ同量(0.61~1.8meq/100g soil)減少した。この結果からも、地表面に施用した石膏中のCa²⁺は、降水と共に土中に浸入し、土壌中の交換性Al³⁺と交換して土壌に吸着したことが確認できる。

Ca²⁺と交換して土壌溶液中へ出てしまったAl³⁺は、直ちに水と反応して、難溶性の水酸化アルミニウムを形成する。したがって、国頭マージに石膏を施用したときに、

- 1) 石膏(CaSO₄)水溶液が土壌中に流れ込んで、交換性Al³⁺と石膏のCa²⁺がイオン交換を生じる。
- 2) 交換の結果Ca²⁺が土壌に吸着すると、粘土粒子周囲の電荷密度が変化し、拡散二重層が広がって厚くなり土壌の分散が進む
- 3) 交換の結果土壌水中に出たAl³⁺は、水と反応してAl(OH)₃を形成するためライシメータ底部からの排水のECには寄与しない

という現象が生じていたと考えられる。

(3) 石膏による土壌懸濁液の凝集沈降実験

水酸化アルミニウムには、コロイドの凝集効果があることも知られている。そこで、石膏との反応によって国頭マージの分散が促進し得るかどうかを確認するため、

1Lのメスシリンダーに土壌懸濁液を作り、その中に石膏を入れて土壌懸濁液の分散凝集を土粒子の沈降や濁度から調べた。

土壌懸濁液の濃度は、粒度分析に用いるような高濃度のものからライシメータ実験の地表面流出中の土砂濃度と同じくらいの薄いものまでいくつか行った。

OHP-22は、結果の一例で、1Lあたり土壌が1g, 3gという地表面流出水と同程度の薄い土壌懸濁液の場合である。石膏を入れ、十分攪拌してから10分、40分という間は、石膏の入っているメスシリンダーの方が色が濃く土壌の分散が促進されていることがわかる。その後120分を過ぎると逆に石膏を入れたメスシリンダーの方で土粒子の沈降が著しくなり、1440分後には、石膏を入れたものだけが透明になった。

この結果から、短い時間スパンでは、石膏の施用はマージの分散を促進するが長時間になると凝集を進めるという二段階の効果があることがわかる。すなわち、短時間では、一般に反応が速いイオン交換による拡散二重層の拡大が分散を進め、時間が長くなると、水酸化Alの析出物の成長による架橋作用が発現してきたものと考えられる。

7. 本研究で得られた成果

人工降雨を用いた室内実験で表層クラストを形成し、以下のことを明らかにした。

1) クラストの機能と構造

- 地表面における構造クラストの形成は、乾燥密度、透水性、水分特性等の土壌物理性を大きく変える。
- 構造クラストの形成に伴い、地表面では透水性が大きく低下し、降雨前には予想できないような地表面流出が発生する。
- 構造クラスト自身の耐食性は高いが、地表面流出の促進によって耐食性を低下させると考えられる。
- 構造クラストが形成している土層は、クラスト層、遷移（目詰まり）層、下層からなる三層構造と見なせる。

2) 構造クラスト形成のメカニズム

- クラスト形成過程は、土の性質のみならず、団粒径、初期水分、降雨の性質といった要因の影響を受ける。
- 構造クラストは、形成過程からスレーキング型、非スレーキング型に大別できる。さらに、同じ土であっても、形成過程が異なれば違う構造を示す。

3) 石膏がクラスト形成に及ぼす影響

- 石膏は、酸性土中の Al^{3+} を Ca^{2+} で交換することで植物根の生理障害を改善するが、このイオン交換は同時に土壌の分散性を増し、クラストの形成を促進する。

8. おわりに

本研究は、表層クラストの形成とその影響というどちらかといえば問題解決型の研究課題を知見追求型の姿勢で調べたものです。しかし、成果としては、石膏の影響など現場においても検討の価値のあるものが得られたと考えています。また、研究を進める中で、土層の物理性と受食性というどちらかといえば物理的な研究の領域を越え、土壤中における「石膏と土の反応」という土壤化学的な部分まで手を広げざるを得なくなりました。このような境界領域の研究というものは、今後ますます重要になると考えられますが、このように研究対象を広げる機会を「今」強いてくれたという点でもこの「降雨によるクラスト形成が土壌の物理性・受食性に及ぼす影響に関する研究」は重要な研究であったと思います。

9. OHPリスト

OHP1	タイトル
OHP2	既往の研究
OHP3	本研究の目的
○OHP4	降雨実験の模式図
○OHP5	クラスト形成と地表面流出
○OHP6	クラスト形成に伴う乾燥密度変化量
○OHP7	地表面流出中の流亡土砂(wash)濃度
○OHP8	円筒カラムの模式図
○OHP9	定常状態のマトリックポテンシャル分布
○OHP10	クラスト層の透水係数
○OHP11	クラスト層の水分特性
○OHP12	団粒破壊実験の模式図
○OHP13	団粒破壊実験の結果
OHP14	クラストの構造
OHP15	クラストの分類
OHP16	酸性土壌への石膏の施用
○OHP17	石膏の施用と地表面流出発生の変化
OHP18	石膏の施用とクラストの構造の変化
○OHP19	降雨実験中の地表面流出水とライシメータ底部からの排水の電気伝導度
○OHP20	ライシメータ底部からの排水中のCa ²⁺ イオン濃度
OHP21	国頭マージの交換性陽イオン
OHP22	降雨中に土壌内に生じた反応
OHP23	石膏が国頭マージ土壌懸濁液の分散凝集に及ぼす影響
OHP24	まとめ

注) ○印は、発表要旨に掲載

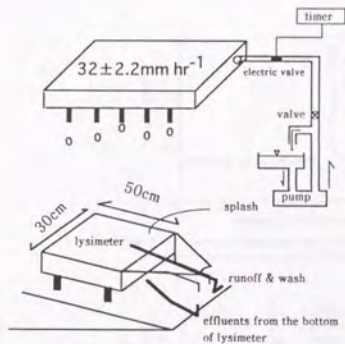


Fig. II-1 Schematic of a rainfall simulator and a lysimeter

OHP4 降雨実験の模式図

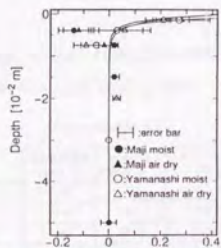
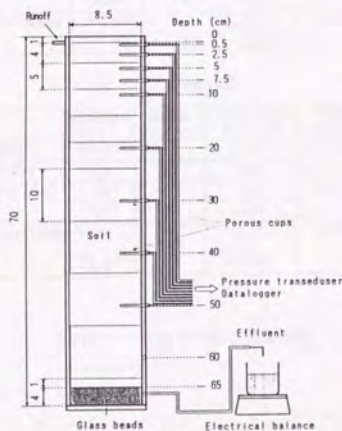


Fig. IV-3 Changes in bulk density profile due to surface crust formation (6° slope)

OHP6 クラスト形成に伴う乾燥密度変化量



OHP8 円筒カラムの模式図

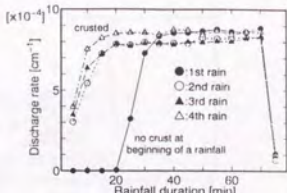


Fig. VI-9(c) Runoff from 11° slope during 1st to 4th rainfall (Yamanashi moist)

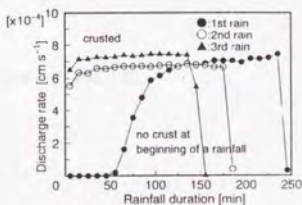


Fig. VI-11(a) Runoff during a rainfall (Maji moist 6° slope)

OHP5 クラスト形成と地表面流出

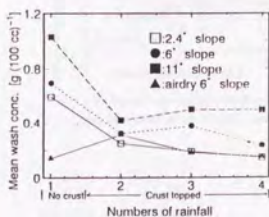


Fig. VII-5(a) Mean wash concentration of runoff from different slopes and initial water contents (Yamanashi)

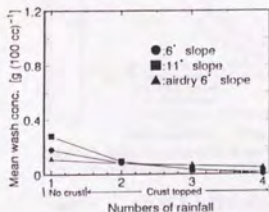


Fig. VII-5(b) Mean wash concentration of runoff from different slopes and initial water contents (Maji)

OHP7 地表面流出中の流亡土砂(wash)濃度

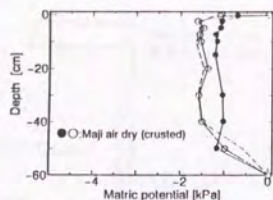


Fig. V-17 Steady matrix potential profile of crusted soil column during rainfall (Maji air dry)

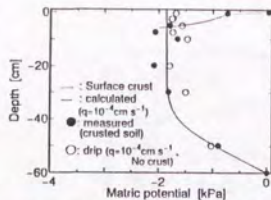


Fig. V-18 Matrix potential profile for steady infiltration during rainfall (Ywet3)

$$\psi = \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{-1}{k(\psi)} d\psi + z_1$$

ψ : マトリックポテンシャル
 ψ_1, ψ_2 : 下境界層における位置とポテンシャル
 q : 水フラックス
 $k(\psi)$: 保水土の不透和透水係数

OHP9 定常状態のマトリックポテンシャル分布

カラム実験、ライシメータ実験におけるクラストの透水係数

降雨前 山梨粘土ローム: $1.8 \times 10^{-1} \text{ cm s}^{-1}$ / 園頭マージ: $8 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$

(a) カラム実験の結果

	定常底部排水 [cm s ⁻¹]	水頭勾配 [cmH ₂ O cm ⁻¹]	クラストの透水係数 [cm s ⁻¹]	平均値 [cm s ⁻¹]
山梨 (湿潤)	5.9×10^{-5}	45	1.3×10^{-4}	7.2×10^{-4}
	5.9×10^{-5}	31	1.9×10^{-5}	
	1.4×10^{-4}	19.3	7.2×10^{-4}	
山梨 (湿土)	1.2×10^{-4}	11.1	1.1×10^{-4}	1.3×10^{-4}
	(4.0×10^{-5})	27.5	(1.5×10^{-4})	
園頭マージ (湿潤)	2.2×10^{-4}	31.1	7×10^{-4}	8.5×10^{-4}
	2.8×10^{-4}	27.4	1.0×10^{-4}	
園頭マージ (湿土)	(5×10^{-4})	31.9	(1.8×10^{-4})	1.1×10^{-4}
	1.2×10^{-4}	31.3	8.0×10^{-4}	
園頭マージ (風乾土)	(1.2×10^{-4})	15.2	7.5×10^{-4}	7×10^{-4}
	1.5×10^{-4}	23.0	8.5×10^{-4}	

(b) ライシメータ実験の結果

	定常底部排水 [cm s ⁻¹]	水頭勾配 [cmH ₂ O cm ⁻¹]	クラストの透水係数 [cm s ⁻¹]	平均値 [cm s ⁻¹]
山梨 (湿土)	2.1×10^{-4}	4.6	4.6×10^{-4}	(4.8×10^{-4})
山梨 (風乾土)	1.5×10^{-4}	8.3	1.8×10^{-4}	(1.8×10^{-4})
園頭マージ (湿土)	1.3×10^{-4}	12.8	1.0×10^{-4}	1.1×10^{-4}
	1.5×10^{-4}	12.7	1.2×10^{-4}	
園頭マージ (風乾土)	2.9×10^{-4}	9.1	3.2×10^{-4}	3.1×10^{-4}
	3.5×10^{-4}	10.2	3.4×10^{-4}	

OHP10 クラスト層の透水係数

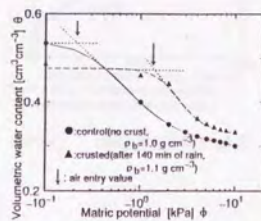


Fig. IV-6 Water retention curves of crusted soil samples (Yamanashi clay loam)

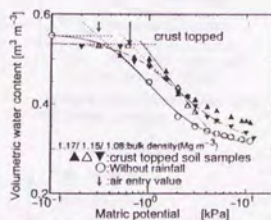
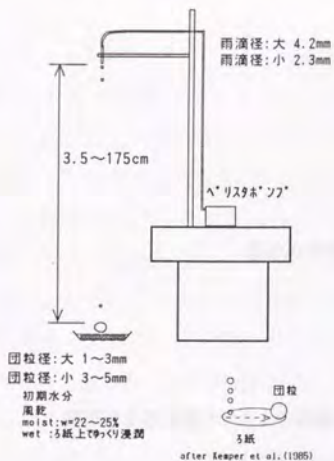


Fig. IV-7 Water retention curve of soil samples with and without surface crust (Maji soil)

OHP11 クラスト層の水分特性



OHP12 団粒破壊実験の模式図

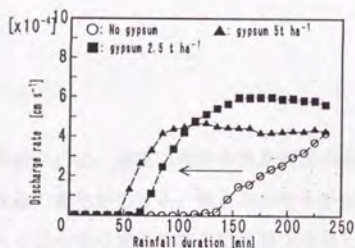


Fig. Effects of initial water contents and gypsum application on runoff event (Air dry soil)

OHP17 石膏の施用と地表面流出発生の変化

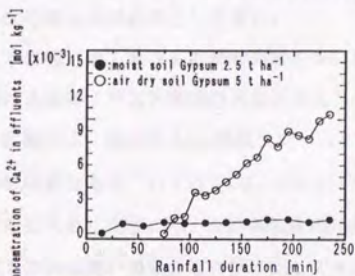


Fig. Ca²⁺ concentration in effluents (Maji)

OHP20 ライシメータ底部からの排水中のCa²⁺イオン濃度

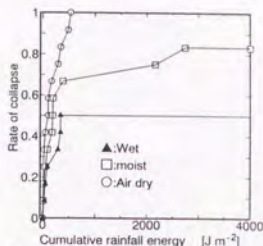


Fig. III - 2(a) Collapse of aggregates (aggregates smaller than rain drops)

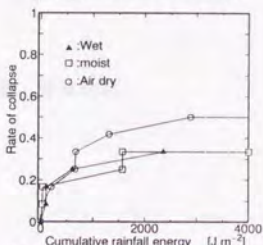


Fig. III - 2(b) Collapse of aggregates (aggregates larger than rain drops)

OHP13 団粒破壊実験の結果

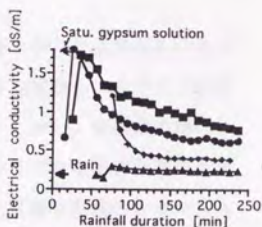


Fig. Changes in electrical conductivity of runoff during a rainfall

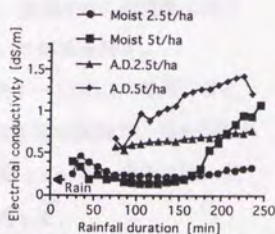


Fig. Changes in electrical conductivity of effluents from the bottom of the lysimeter

OHP19 降雨実験中の地表面流出水と

ライシメータ底部からの排水の電気伝導度

論文の内容の要旨

降雨による表層クラストの形成が土層の物理性・受食性に 及ぼす影響に関する研究

西村 拓

降雨中には、雨滴の作用や地表面流去水の作用で表層クラストの形成という土壌構造の変化が生じる。雨水の利用や侵食の対策という立場から、クラスト形成による透水性の変化の把握は重要な課題となってきた。しかし、地表面の薄い土層であるという小さなサイズや降雨中に形成して降雨中に大きな影響を及ぼす割には降雨後の持続性がないという特徴から、クラストの性質や形成のメカニズムには不明な点が依然として多い。

本研究では、室内人工降雨装置を用いた実験を行い、湿潤地域の非塩類土壌における表層クラスト形成のメカニズムとその影響について知見を得た。

供試土は、火山灰土(山梨粘土ローム)と酸性土(国頭マージ)の二つを用いた。母材は異なるが、いずれもLiC、CLという類似した土性を持つ試料で、透水係数が非常に大きく実験に用いた降雨強度の10倍以上の値を持っていた。実験には、供試土の3mm篩い通過分を必要に応じて水分調整して使用した。

室内人工降雨装置は自作のもので、実験では強度、 $32 \pm 2.2 \text{ mmh}^{-1}$ の降雨を与え

た。このときの降雨エネルギーは $450\text{Jm}^{-2}\text{h}^{-1}$ である。

長さ50cm幅30cm深さ10cmのアクリル製の箱に供試土を詰めて行ったライシメータ実験と内径8.5cm長さ60cmの円筒土層を用いたカラム実験を行い、表層クラスト形成に伴う、降雨の浸透、地表面流出並びに土壌流亡量の変化を調べた。さらに、形成のメカニズムに関して、団粒の破壊、クラストの構造、および石膏の施用がクラストの形成に及ぼす影響を調べた。各降雨実験後には、ライシメータ、円筒土層の表面から土壌試料を採取して、土壌の物理性、化学性の変化を調べた。

Fig.1は、山梨粘土ロームに降雨を与えたときの地表面流出の様子である。供試土の非常に大きな透水性から地表面流出が発生しないことが予想されたが、実際には、降雨開始後20分で地表面流出が発生した。国頭マージについても、発生時間は異なるが同じ傾向を示した。

Fig.2は、山梨粘土ロームのカラム土層内の定常時のマトリックポテンシャル分布である。表層クラストのない場合のポテンシャル分布との比較から 前述の、予想外の地表面流出の発生は地表部の土壌の物理性の変化を反映していることがわかる。特に表面から深さ0.5cmまでの層における大きな動水勾配は、この部分の土層の透水性がきわめて小さいことを示している。山梨粘土ローム、国頭マージとも地表部のクラストの透水係数は、 10^{-5}cm s^{-1} で降雨前の透水係数の1000分の1から10000分の1まで低下したことが明らかになった。

クラスト土層は、ポテンシャル分布から3層に分類された。すなわち、地表から0.5cmの所までのクラスト層とその下、0.5から5~7.5cmの深さまでの遷移層、さらに下方のクラスト形成の影響をほとんど受けていない3番目の土層である。国頭マージの場合も、各層の厚さは異なるが同様の3層構造を示した。

Fig.3は、クラスト形成に伴う各深さの土壌の乾燥密度の変化量を示したもので

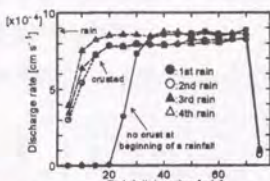


Fig. 1 Runoff from 11° slope during 1st to 4th rainfall (Yamanashi moist soil)

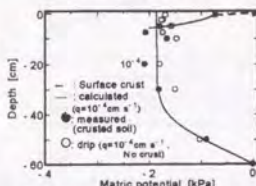


Fig. 2 Matrix potential profile for steady infiltration during rainfall (Ywet3)

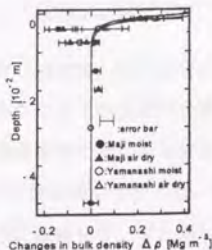


Fig. 3 Changes in bulk density profile

ある。図中の横棒は各データの標準偏差で、3層構造のうち最表層である地表面から0.5cmのクラスト層で20~30%という大きな増加が見られた。

2番目の遷移層について、この層における土壌物理性の変化を知るために不飽和と透水係数の決定を行った。

Fig.4は国頭マージについての結果で、降雨前の供試土とクラストの下方、深さ0.5~1.5cmの層と1.5~3cmの層の不飽和透水係数を示した。マトリックポテンシャル-1~-2kPaの領域では、クラスト直下の層の不飽和透水係数は降雨前の供試土よりも小さな値を示したが、-3~-4kPa付近では漸近

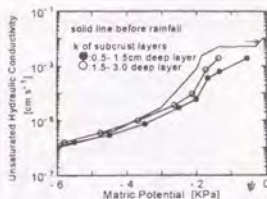


Fig.4 Unsaturated hydraulic conductivity of Maji soil (crust topped, drainage process) (axis shows saturated hydraulic conductivity of Maji soil)

していく傾向を示した。この結果から、降雨中に分散土粒子の土中への流入によるクラストの下方の土層における間隙の目詰まりがわかる。

地表面流出水中の土砂濃度の変化から、今回用いた粘性土では、クラストが形成すると地表面流出が増す一方でクラスト部の耐食性は強くなるのがわかった。実際の圃場では、植生や石の陰などクラストの出来にくい弱い部分があるため、クラストが形成すると、たとえクラスト部の耐食性が高くとも、圃場内の弱い部分に地表面流出を集中させてリルやガリ等の深刻な浸食のきっかけを作るものと考えられる。

クラスト形成のメカニズムを解明するために一つ一つの団粒に水滴を一滴ずつ落下、衝突させる団粒破壊実験を行った。この実験では、水滴径、団粒径ならびに団粒の初期水分の組み合わせ12通りの条件について行った。Fig.5に団粒破壊実験の結果の一部を示した。団粒径が水滴径よりも小さな場合には、団粒の崩壊は、初期水分に大きく依存した。すなわち、風乾土では、降雨開始後速やかに全ての団粒が崩壊するが、初期水分が増すにつれて崩壊が少なくなり、破壊実験前に充分湿らせた団粒は、4000 Jm⁻² (200~300mmの降雨に相当)でも半分位しか崩壊しなかった。団粒径が水滴径よりも大きな場合は、団粒の崩壊は初期水分に依存せず、▼と同じ変化を示した。引き続き行った同じ試料、水滴条件を用いたクラスト形成実験では、クラストの構造から同じ結果が導かれた。すなわち、表層クラストの形成

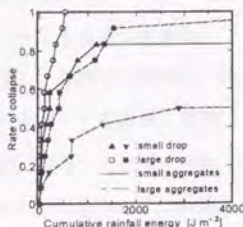


Fig.5 Collapse of aggregates due to raindrop impact (Maji, air dry)

は土壌の性質のみならず水分、降雨の性質といった「条件」に左右される。

国頭マージの様な酸性土壌では、土壌中のAlの植物根への生理障害を防ぐために石膏や CaCO_3 などのCa塩を散布する。このとき生じる土壌中の交換性Alと石膏のCaの交換は、塩類土壌での改良でよく用いられるNaとCaの交換とは逆に粘土粒子の拡散二重層を広げて、土壌の分散性を高める可能性がある。そこで、石膏を施用したライシメータ実験を行い、石膏を施用した際の地表面流出とライシメータ底部からの排水について、電気伝導度(EC)、pH、 Ca^{2+} 濃度の測定を行った。

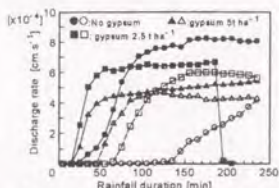


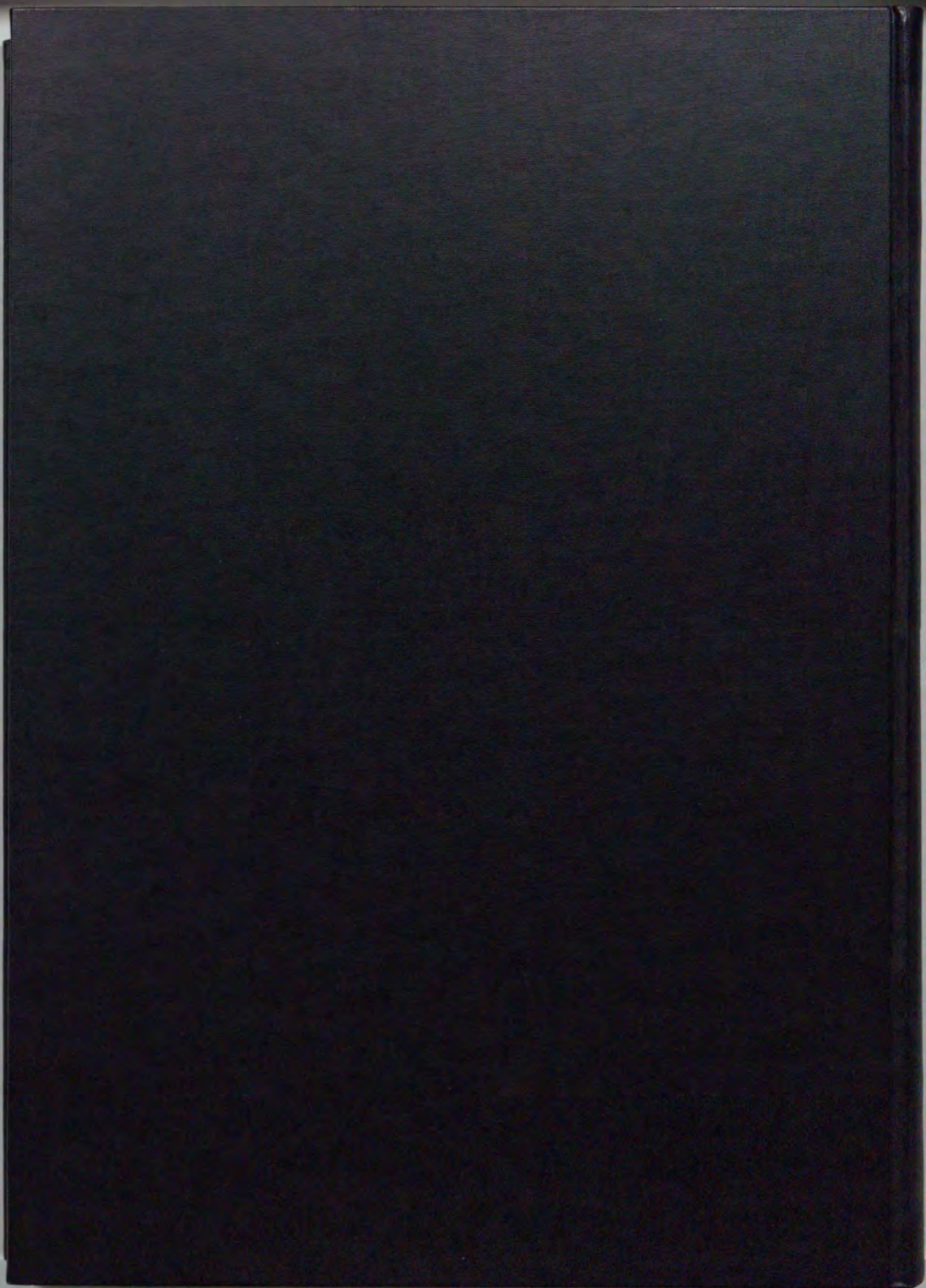
Fig. 6 Effects of initial water contents and gypsum application on runoff event.

(Close and open data show results of sandy and moist soil respectively)

Fig. 6に示したように、石膏の施用によりクラストの形成並びに地表面流出の発生が促進された。このとき、ライシメータ底部からの排水中のECは、降雨中常に小さな値を示した。特に、供試土の初期含水比が25%の場合には、底部からの排水のECは、降雨開始後150分間は降雨とほぼ同じ値を示した。地表面では石膏の施用により高濃度の石膏水溶液が土中に浸透しているため、土層中に流れ込んだ石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)がライシメータ内の土壌に保持されたことがわかる。

降雨後、ライシメータ内から土壌を採取して交換性陽イオンを測定した結果、土壌の交換性 Ca^{2+} は、石膏を与えた降雨の後に大きく増加し、同時に交換性 Al^{3+} が Ca^{2+} の増加とほぼ同量減少した。このことから、地表面に施用した石膏は、降雨に溶けて土中に浸入し、土壌中の交換性Alと交換して土壌に吸着したと考えられる。さらに、 Ca^{2+} と交換して土壌溶液中へ出てしまった Al^{3+} は、直ちに水と反応して、難溶性の水酸化Alを形成するためにライシメータ底部からの排水のECが小さな値を示したものと考えられる。

水酸化Alには、コロイドの凝集効果もあることが報告されているが、土壌懸濁液凝集沈降実験から降雨実験で用いたような短い時間スパンでは、石膏の施用はマージの分散を促進し、長時間になると凝集を進めるということが明らかになった。すなわち、短時間では、一般に反応が速いAl-Caイオン交換による粘土粒子周囲の拡散二重層の拡大が分散を進め、時間が長くなると、水酸化Alの析出による凝集作用が効いてきたものと考えられる。



INCHES
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale

C **Y** **M**

© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

