

# 筑波大学水理実験センター内アカマツ林および 熱収支・水収支観測圃場における土壤の物理特性

Physical Properties of Soils of Red Pine Forest and Heat Balance and  
Water Balance Experiment Field in Environmental Research Center,  
University of Tsukuba

濱田 洋平\*・A.R. インドラ F.\*・田中 正\*\*

Yohhei HAMADA, Aneeta Rosari INDRA Fernando and Tadashi TANAKA

## I はじめに

従来より大気中の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) をはじめとする温室効果ガスの濃度上昇に伴う、地球温暖化や気候変動の可能性が論じられているが、近年では気候変動に伴う植生分布の変化に対する関心が高まっている（ウッドワード、1993）。ある地域の植生が変化すればその地域の土壤条件も変化し、新しい植生とあいまってその地域の熱・水・物質の循環を変化させる。このような現象が広域的に生じた場合、植生や土壤の変化が逆に気候条件に影響を及ぼす可能性も考えられる。

より小規模ではあるが既に進行している植生変化としては、主として熱帯林地域における森林伐採などの人為的な改変が挙げられる。アマゾン川流域においては、森林伐採後に成立した草地と元の熱帯林との間で、水・熱・ $\text{CO}_2$ の収支に関する大規模な比較研究が行われている (Gash *et al.*, 1996)。

このような状況を踏まえ、著者らは現在、筑波大学水理実験センター内のアカマツ林および熱収支・水収支観測圃場において、林地および草地土壤中における水および $\text{CO}_2$ の動態に関する比較研究を行っている。土壤中における物質移動を考慮する場合、

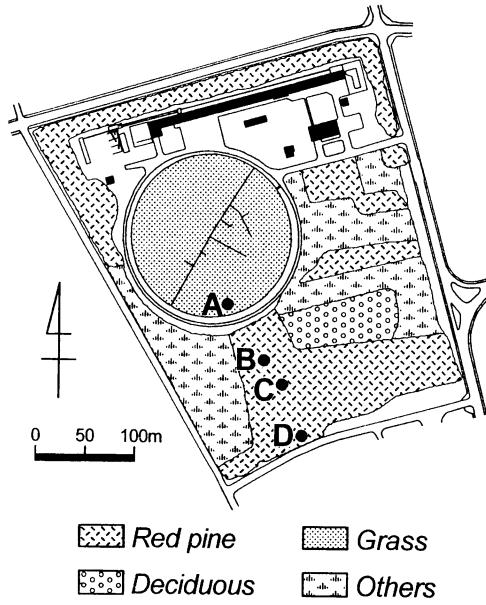
その物理特性を把握することが必要不可欠である。本稿では、アカマツ林および熱収支・水収支観測圃場における土壤の物理特性を明らかにし、それが土壤中の水分量分布に及ぼす影響について考察する。

## II 研究地域の概要

調査対象として、筑波大学水理実験センター（茨城県つくば市）内のアカマツ林および熱収支・水収支観測圃場（以降「観測圃場」）の土壤を設定した。同センターの概要を、調査地点の位置と併せて第1図に示す。当地域は標高27mの平坦な台地上に位置し、同センターの長期観測データによれば、年平均気温は13.3℃、年降水量は1200~1600mmである。

対象としたアカマツ林は、面積0.017km<sup>2</sup>、樹齢約30年の人工林で、立木密度16.5本／100m<sup>2</sup>、平均樹高13.1m、平均胸高直径13.7cmである（宇佐美・及川、1993）。この林は1980年より下刈りが中止されており、林床にはナラ・ウルシなどが点在する。土壤は火山灰を母材とする典型的な淡色黒ボク土で、当地域における代表的な土壤である（安井・及川、1993）。このアカマツ林では杉田ほか（1986）、安井・及川（1993）などによって土壤の断面調査が行われ

\*筑波大学大学院・地球科学研究科 \*\*筑波大学地球科学系



第1図 水理実験センターの概要および調査地点の位置

ており、それによれば、地表面から深度20~25cmまでがA層、それ以深がB層となっている。

一方の観測圃場は、地表面における熱収支・水収支の基礎研究を行う目的で造成された、半径80m、面積約0.02km<sup>2</sup>の平坦な円形の草地である。観測圃場の整備は1977年2月に完了し、その後1978年および1988年に6種類の牧草が播種されたが、現在ではクリーピンググラスと多種の雑草が混じる草地になっている（劉夏・及川、1993）。

また、観測圃場については土壤の断面調査が行われていないため、1997年9月にA地点の近傍において、幅1m、深さ1mの土壤断面を掘り出しその様

第1表 観測圃場における土壤断面の記載

深度(cm)	記載
0~10	表土、暗褐色、団粒状、表層5cmに根が集中して分布
10~25	暗赤褐色、やや粘質、5cm程度の暗褐色の斑紋が分布
25~38-42	粘土層、灰白~灰青色、極めて粘質
38-42~57-60	暗褐色、シルト質、ごく少量の根が分布
57-60~70	黒褐色、シルト質、少量の根が分布
70~80-85	暗褐色、シルト質、ごく少量の根が分布
80-85~100<	暗赤褐色、やや粘質

調査日：1997年9月11日

子を記載した。その結果を第1表に示す。観測圃場の土壤断面はアカマツ林とは著しく異なり、深度10~25cmに明褐色の粘質な土壤が、40~80cmに暗褐色のシルト質土壤が認められた。この土層の位置関係は、アカマツ林に見られるような自然の土壤のそれとは上下が逆になっている。この観測圃場については、整備の際に天地返しが行われたと言われております、観察された土壤断面はこの大規模な土壤改変の事実を示すものである。天地返しは通常、地力の衰えた作土を下層土と入れ替えて土壤を改良するために行われるが、下層土の性質が不良の場合は逆に土壤改悪となる。観測圃場においては、おそらく周囲のアカマツ林からのアカマツの侵入を防止する目的で土壤改悪のために行われたと推察される。また、逆転している土層の間には灰白~灰青色の粘土層が存在した。このような粘土層はアカマツ林には一切認められず、他の場所から客土されたものと考えられる。観測圃場におけるこれらの土壤改変の実態については、土壤の物理特性に関する分析結果に基づいて後ほど詳細に議論する。

### III 方法および結果

#### 1) 土壤試料の採取

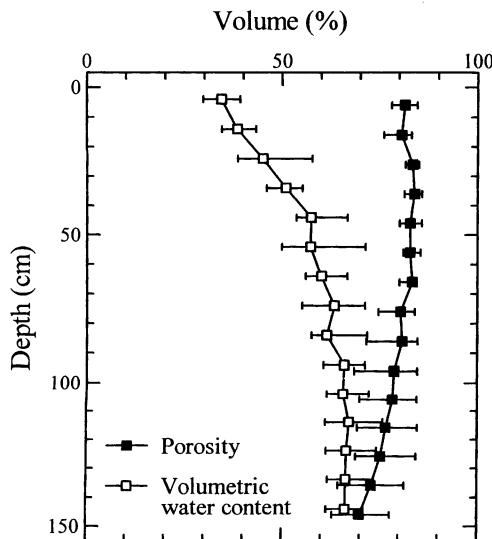
分析に供する不搅乱土壤試料の採取は、アカマツ林については1991年にBおよびD地点で1回ずつ、1992年から1997年にかけてC地点で5回の計7回、観測圃場については1996年および1997年にA地点で計3回行った。土壤試料は、内径5cm、容積100cm<sup>3</sup>の金属製の試料円筒を、円筒を保持するヘッド部と継柄からなる採土器を用いて手で土中に貫入し、試料円筒中に乱すことなく採取した。採取は地表面から10cm間隔で行い、最大で深度150cmまでの土壤を採取した。採取した土壤試料は、乾燥による水分損失を防ぐためにパラフィルムを用いて直ちに密封し、実験室に持ち帰って各種土壤試験の試料として供した。

#### 2) 土壤の三相分布

採取したすべての土壤試料について、間隙率および採取時の体積含水率を求めた。まず体積含水率に

について、採取直後の試料の重量と110°Cで24時間炉乾燥した後の試料の重量との差から、試料中に含まれていた水の重量を求め、それを水の密度で割って体積に換算し体積含水率を算出した。水の密度は1.0g·cm<sup>-3</sup>とした。間隙率については、土壤三相計を用いて採取時の試料の実容積（固相+液相）を測定し、試料円筒の容積と実容積との差から気相率を算出し、既に求められている体積含水率との和をとつて間隙率を求めた。なお、得られた分析値は特に断りのない限り、アカマツ林および観測圃場それぞれについて、各深度ごとの算術平均値を最小値および最大値を示すエラーバーと共にプロットした。

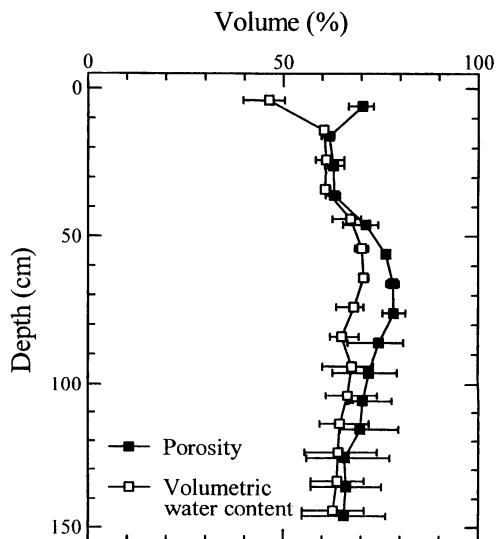
アカマツ林における土壤の三相分布を第2図に示す。間隙率は、地表面から深度70cmにかけては81~84%でほぼ一定であるが、それ以深では深度150cmの69.9%までほぼ一様に減少した。採取時ごとのばらつきを見ると、最大値と最小値の間の差は深度70cmまでは3.4~7.1%，平均5.1%であるのに対し、それ以深では9.4~17.1%，平均14.6%と大きくなかった。体積含水率は、まず地表面から深度50cmまでに34.4%から57.5%まで大きく増加し、続く深度50cmから100cmにかけては57.3%から66.0%まで比較的緩やかに増加し、それ以深では66~67%でほ



第2図 アカマツ林における土壤の三相分布  
間隙率を黒四角、体積含水率を白四角で示した

ぼ一定になった。体積含水率は採取時の土壤水分条件が反映されるため、特に土壤表層では採取時ごとのばらつきが間隙率のそれより大きくなつた。しかし、降雨の最中や直後の試料採取は行われておらず、またほとんどの採取は4~5月に行われ、蒸発散に伴う土壤の乾燥の影響が比較的小さいため、第2図に示した体積含水率の分布は、アカマツ林における重力排水終了後の代表的な分布とみなすことができる。このような間隙率と体積含水率の分布から、気相率は、主として体積含水率の増加に対応して深度とともに減少する分布を示した。

次に、観測圃場における土壤の三相分布を第3図に示す。間隙率は、地表面付近では70%前後とやや大きいが、その直下の深度10~40cmでは62~63%とプロファイル中最小になった。間隙率はそれ以深で増加し、深度60~80cmで約78%とプロファイル中最大となった後再び減少に転じ、深度150cmの65.6%に至るまで緩やかに減少した。一方で採取時ごとのばらつきを見ると、地表面から深度80cmまでは、間隙率の大きな変化にもかかわらず最大値と最小値の差は平均4.8%と、それ以深における差の平均16.9%に比べて小さくなつた。次に体積含水率については、アカマツ林に比べて間隙率の変化が大



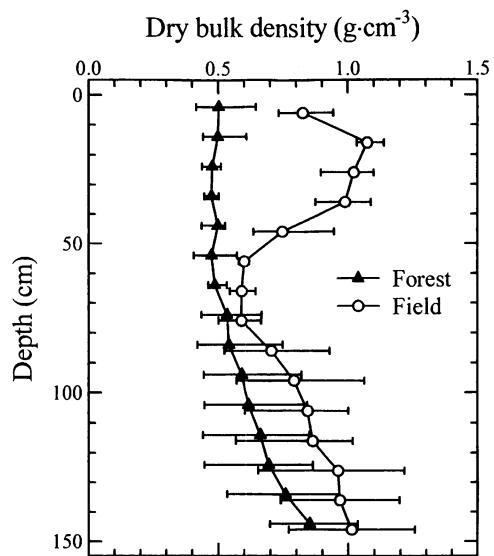
第3図 観測圃場における土壤の三相分布

きいため、気相率の変化と併せて見てゆく。体積含水率は地表面付近では40~50%と小さく、それに応じて気相率も20~30%と大きくなつたが、その直下の深度10~40cmでは体積含水率は間隙率にほぼ等しくなり、気相率は1.4~2.3%と極めて小さくなつた。試料によっては完全に飽和しているものも認められた。体積含水率はそれ以深で増加し、深度50~70cmで約70%とプロファイル中最大を記録するが、間隙率がそれ以上の割合で増加するため、結果として気相率も増加し、深度70~80cmで約10%となつた。それ以深では体積含水率は緩やかに減少するが、やはり間隙率がそれ以上の割合で減少するため、結果として気相率も減少し、深度120cm以深では1.7~2.8%とほぼ飽和に近い状態になつた。採取時ごとのばらつきについては、アカマツ林とは異なり土壤表層でもそれほど認められない。特に深度10~40cmはほぼ飽和していたため、間隙率に見られる以上のばらつきは認められなかつた。

### 3) 乾燥密度

採取したすべての土壤試料について、炉乾燥後の試料の重量を試料円筒の容積で割り、乾燥密度を求めた。

アカマツ林および観測圃場における乾燥密度の鉛直分布を第4図に示す。アカマツ林では、地表面から深度70cmまでは0.5g·cm<sup>-3</sup>前後でほぼ一定で、採取時ごとのばらつきも小さいが、それ以深では深度150cmの0.85g·cm<sup>-3</sup>まで緩やかに増加し、採取時ごとのばらつきも大きくなつた。観測圃場では、地表面付近では0.83g·cm<sup>-3</sup>であるが、深度10~40cmでは0.99~1.07g·cm<sup>-3</sup>へ大きく増加した。乾燥密度はそれ以深で減少し、深度50~80cmで約0.6g·cm<sup>-3</sup>とプロファイル中最小となった後、深度150cmの1.01g·cm<sup>-3</sup>まで緩やかに増加した。採取時ごとのばらつきを見ると、地表面から深度80cmまではそれ以深に比べてばらつきが小さくなつた。アカマツ林および観測圃場におけるこのような乾燥密度の鉛直分布は、前に示した三相分布における固相率の鉛直分布に極めてよく対応している。

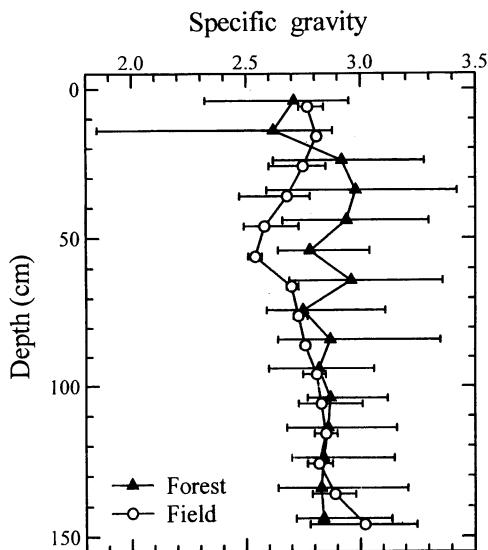


第4図 アカマツ林および観測圃場における乾燥密度の鉛直分布  
アカマツ林を黒三角（Forest）、観測圃場を白丸（Field）で示した

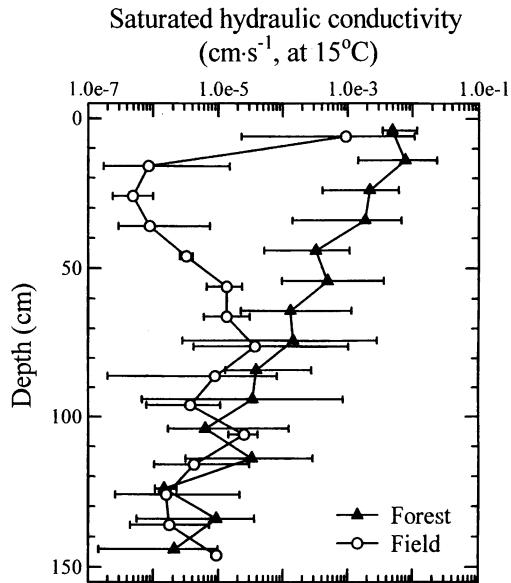
### 4) 真比重

採取したすべての土壤試料について、炉乾燥後の試料の重量を固相率で割って固相成分の密度を求め、さらに水の密度で割って真比重を算出した。水の密度は1.0g·cm<sup>-3</sup>とした。なお、この手法で求めた真比重は、土粒子のほかに土壤中の有機物などを含めた固相成分についての平均的な値となる。

アカマツ林および観測圃場における真比重の鉛直分布を第5図に示す。アカマツ林では、地表面から深度20cmまでは2.6~2.7とやや小さいが、それ以深では深度によってややばらつきはあるものの2.7~3.0でほぼ一定になつた。この値は関東ロームに含まれる土粒子の真比重についての代表的な値にほぼ一致する。地表面付近の値が小さいのは、土粒子に比べて密度の小さい有機物の影響によるものと考えられる。観測圃場では、深度40~60cmにおいて2.55前後と小さいことを除けば、やはり2.7~3.0の範囲内であった。観測圃場の深度50cm前後には、圃場整備に伴う土壤改変によって元の表土が埋積していると推測されることから、この真比重の減少もやはり有機物の影響によるものと思われる。



第5図 アカマツ林および観測圃場における真比重の鉛直分布



第6図 アカマツ林および観測圃場における飽和透水係数の鉛直分布

### 5) 飽和透水係数

採取した土壤試料を用いて透水試験を行い、飽和透水係数を測定した。アカマツ林については、各深度ごとに3～6個の試料を選択し、水浸法によって飽和させた後分析に供した。また、地表面から深度50cmまでの試料については定水位法と変水位法の両方を用いて測定し、それ以深については変水位法のみによって測定した。観測圃場については、採取したすべての試料について変水位法を用いて測定した。得られた測定値について、水温による水の粘性の変化を補正して15°Cにおける値に換算し、各深度ごとに幾何平均をとってグラフにプロットした。

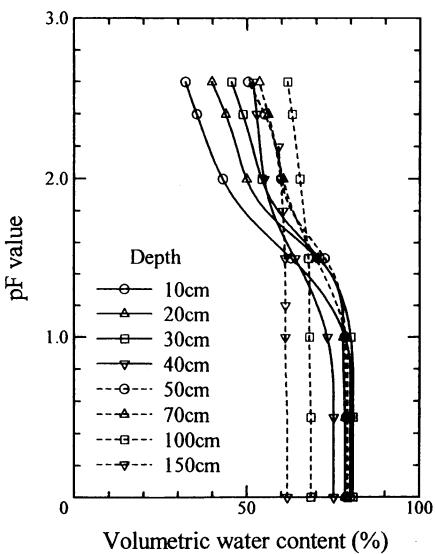
アカマツ林および観測圃場における飽和透水係数の鉛直分布を第6図に示す。アカマツ林では、深度によって多少ばらつきがあるものの、地表面付近の $10^{-2}$ に近い値から深度120～150cmの $10^{-6}$ オーダーの値まで、深度に対して指指数関数的に減少した。定水位法および変水位法による測定値を比較すると、前者による値が後者による値より若干大きくなる傾向が認められたが、試料数が少ないため、この差がそれぞれの方法に供した土壤試料の個体差によるものか、あるいは方法の違い自体に起因するものかは断定できなかった。観測圃場では、地表面付近では

$10^{-4} \sim 10^{-3}$ のオーダーであるが、深度10～40cmでは $10^{-7}$ オーダーまで急激に減少した。その後、深度50～80cmでは $10^{-5}$ オーダーまで増加するが、深度110cm以深で再び $10^{-6}$ オーダーまで減少した。

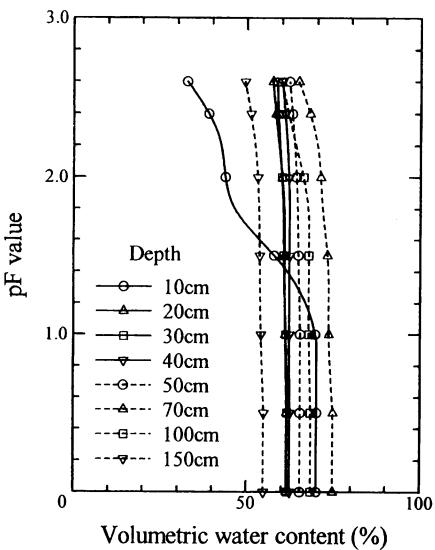
### 6) 水分特性曲線

採取した土壤試料を用いてpF試験を行い、各深度についての水分特性曲線を作成した。アカマツ林および観測圃場の両方について、複数の深度を選択し、それらの深度の試料の幾つかを用いてpF試験を行った。pF試験は吸引法によって行い、水浸法によって飽和させた試料から、pF0～2は水頭法、それ以上は減圧法を用いて最大でpF2.6まで排水を行った。得られた水分特性曲線の中から、野外において実測された体積含水率とpF値との関係を最もよく再現しているものを、その深度を代表する水分特性曲線として選択しグラフにプロットした。

アカマツ林における各深度の水分特性曲線を第7図に示す。まず、深度10cmから70cmまでの曲線について見ると、pF0～1の間ではほとんど排水がないが、pF1から排水が始まり、pF2までの間に比較的急速に排水が進み、それ以降はやや緩やかに排水されるという共通の傾向が認められた。pF0～2.6



第7図 アカマツ林における各深度の水分特性曲線



第8図 観測圃場における各深度の水分特性曲線

の総排水量は、体積含水率にして深度10cmの47.8%から、40~70cmの25%前後まで深度とともに減少した。また、pF1~2の間の排水量の総排水量に占める割合は、64.8~78.2%といずれも大きくなつた。これに対して、深層の深度100cmおよび150cmでは、総排水量がそれぞれ6.8%および2.6%と小さく、またpF1.5以降で排水が生じるが、その傾向は深度10~70cmに比べて不明瞭であった。

観測圃場における各深度の水分特性曲線を第8図に示す。深度10cmについては、pF1~2の間で急速に排水が進むという、アカマツ林の表層と同様の傾向が見られた。総排水量は37.3%，うちpF1~2の間の排水量の占める割合は69.2%であった。対照的に深度20~50cmは極めて排水が悪く、総排水量は2.3~4.1%に過ぎず、排水が始まるpF値は特定できなかった。それ以深の深度70~150cmでは、総排水量は5.5~10.0%とやや多くなり、またpF0~2の間でも若干排水が生じるもの、pF2以降で主要な排水が生じた。

#### IV 考察

##### 1) 観測圃場における土壤改変の定量的評価

先に述べたように、観測圃場の土壤は大規模な改変を受けており、土壤断面についての記載から、地表面から深度25cmまでの間に元の下層土、深度40~80cm前後に元の表土と推測される土壤が埋積しており、その間に挟まれて灰白~灰青色の粘土層が存在している。分析の結果得られた土壤の物理特性もこの事実を支持しており、深度50~80cmでは間隙率（第3図）と飽和透水係数（第6図）が大きく、乾燥密度（第4図）と真比重（第5図）が小さくなっているのに対し、深度10~40cmではこれとは逆の傾向が見られる。

このように、観測圃場における土壤改変の事実は定性的には明らかであるが、これら元の表土や下層土がもともとどの深度に存在していたのか、改変に伴ってどの程度の圧密を受けたのかといった点については明瞭ではない。ここでは分析から得られた乾燥密度の値を用いて、固相成分の重量に基づく土壤改変の実態についての定量的な評価を行う。

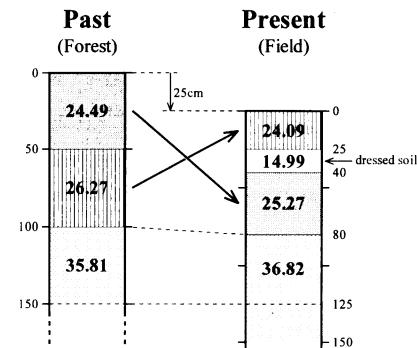
まず、土壤改変前のA地点周辺の土壤条件であるが、観測圃場が整備される以前はアカマツ林であったとされているため、現在のアカマツ林土壤と同様であったと仮定し、B~D地点のデータを改変以前のA地点の土壤データとして適用した。次に、元の表土（深度40~80cm）および下層土（深度0~25cm）の単位面積当たりの固相重量を計算すると、それぞれ25.27および24.09g·cm<sup>-2</sup>となる。このうち

まず元の表土について、改変以前の土壤の乾燥密度を地表面から下向きに累積していくと、深度50cmで $24.49\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ になり、元の表土の固相重量にはほぼ一致する。よって現在の深度40~80cmに存在する土壤は、もともとは地表面から深度50cmの間に存在していたと推察される。改変に伴って土層厚は50cmから40cmへと20%減少し、単位体積当たりの固相重量は約1.25倍になる。分析の結果を見ると、観測圃場の深度50~80cmの乾燥密度は約 $0.6\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ であり、アカマツ林の0~50cmの $0.5\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ よりも実際に2割程度増加している（第4図）。

下層土についても同様の解析を行うと、改変以前の土壤の深度50~100cmの固相重量は $26.27\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ となり、元の下層土の固相重量にはほぼ一致する。よって現在の深度0~25cmの土壤は元の50~100cmから移動されたものと考えられ、改変の過程で土層厚は50cmから25cmへと半分になり、単位体積当たりの固相重量は約2倍になる。分析の結果も同様に、観測圃場の深度0~30cmの乾燥密度は $0.8\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ であり、アカマツ林の50~100cmの $0.5\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ の約2倍になっている（第4図）。

また、残された改変以前の土壤の深度100~150cmの固相重量は $35.81\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ であり、現在の土壤の深度80cmから累積すると、125cmで $36.82\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ に達しほぼ一致する。この深度の土壤は他の深度へ移動されてはいないが、土層厚は50cmから45cmへと10%減少しており、観測圃場の整備に伴って若干の圧密を受けたと考えられる。これらの深度について分析結果を比較すると、観測圃場の方がアカマツ林よりも間隙率がやや小さく（第2図および第3図）、乾燥密度がやや大きく（第4図）なっており、この結果を裏付けるものとなっている。

これらの各土層が受けた圧密によって、現在の土壤は改変以前よりも40cm低下することになるが、深度25~40cmに粘土層を客土することによって、改変に伴う標高の低下は25cmにとどまる。客土された粘土の固相重量は $14.99\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ に相当する。現在のアカマツ林と観測圃場A地点の標高を比較すると、実際に20~30cmほどA地点の方が低くなっている、解析の結果得られた標高差は現実とよく適合



第9図 観測圃場における土壤改変の概要  
左側が改変以前、右側が現在の土層分布を示す。  
土柱内の太字は各土層の固相重量 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )、  
土柱の横の数字は深度 (cm) を表す。

している。

最後に以上の解析結果をまとめて第9図に示す。

## 2) 体積含水率に及ぼす土壤の物理特性の影響

野外における土壤の体積含水率は、降水や蒸発散、地下水位などのほか、土壤それ自体の透水・保水特性によって強く規定される。土壤の透水性や保水性は土壤の間隙構造に強く依存するため、間隙率などの土壤間隙に関するパラメーターとの相関が予想される。そこで本節では、アカマツ林および観測圃場における間隙率と透水・保水特性との関係を議論し、野外における体積含水率の分布に及ぼすこれらの特性の影響について考察する。

まず、アカマツ林における間隙率の鉛直分布を見ると（第2図）、地表面から深度70cmにかけてはほぼ一定で、採取時ごとのばらつきも小さいのに対し、それ以深では深度とともに減少し、ばらつきも大きくなつた。この理由としては次のような可能性が考えられる。すなわち深度70cm以深の土壤深層では、上からの荷重によって下層ほど大きな自然の圧密を受けており、また土壤の母材である火山灰の堆積条件や風化の度合の局所的な差異が採取時ごとのばらつきの原因となっている。これに対して地表面から深度70cmまでの土壤表層では、アカマツの根の伸長に伴う間隙構造の変化などの土壤生成作用が進んでおり、その過程で深度による圧密の違いや母材の局所的な差異が均質化されたと考えられる。杉田ほ

か（1986）はアカマツの根系分布を測定し、特に間隙構造の変化に重要と思われる直径2mm以上の根が、深度80cm以深で大きく減少するという結果を報告している。またIndra *et al.* (1997) は、アカマツ林内のC地点における土壤水ポテンシャルの鉛直分布から、アカマツによる蒸散の影響が及ぶ深度を70cmと推定している。これらの結果はこの推測の妥当性を示唆するものである。

次に、アカマツ林における土壤の透水・保水特性との関係を議論する。まず、保水性の指標である水分特性曲線を見ると（第7図）、深度10～70cmについては空気侵入値、すなわち排水が始まるpF値が1であることが明瞭に示されたのに対し、深度100cmおよび150cmでは不明瞭であった。一般にpF値の低い範囲では、圧密を受けた土壤は圧密を受けずに团粒構造を維持している土壤に比べて初期の排水量が小さい傾向が知られており（ヒレル、1984）、水分特性曲線の深度による違いは、間隙率の鉛直分布から推測された、深度による圧密の影響の違いによく対応する。このことから、深度10～70cmの水分特性曲線に見られる共通の特徴は、間隙率を均質化したものと同様の土壤生成作用によって生じたと考えられる。

その一方、深度10～70cmについて同じpF値における排水量を比較すると、深度の増加に伴って減少する傾向が示されている（第7図）。また透水性を見ると、飽和透水係数は深度に対して指数関数的に減少しており（第6図）、つまり土壤表層では急激に、深層では比較的緩やかに減少している。実際には、アカマツの根系は深度80cm以深で大きく減少しているほか、全深度を通じて全般的に深度とともに減少する傾向を示している（杉田ほか、1986）。また地表面付近では土壤動物の活動に伴う間隙構造の変化や、粘土粒子の溶脱や土壤有機物の混合による土性の変化が生じていると推察される（例えば真比重の鉛直分布、第5図）。これらの作用によって、間隙の総量は変化しないものの、間隙の形状や連続性に深度による違いが生じ、飽和透水係数や水分特性曲線に見られるような透水・保水特性の違いが生じたと考えられる。

以上の結果を踏まえてアカマツ林の土壤を透水・保水特性の異なる土層に分類すると、深度70cm前後を境に大きく2つに分けられる。地表面から深度70cmまでの土壤表層では、透水性は深度とともに急速に減少し、保水性は緩やかに増加するが空気侵入値はpF1で一定である。一方の深度70cm以深の土壤深層では、透水性は深度に対して緩やかに減少し、保水性は表層より高く空気侵入値は不明瞭である。実測された野外における体積含水率の鉛直分布は、表層では深度とともに大きく増加し、深層では比較的緩やかに増加あるいはほぼ一定になるという分布を示しており（第2図）、深度による透水・保水特性の違いによく対応しているといえる。

次に、観測圃場の土壤に関して同様に議論する。先に述べたように、観測圃場の土壤は人為的に大きな改変を受けており、地表面から深度40cmまでは元の下層土および客土された粘土の層になっており、その下の深度40～80cmに元の表土が埋積している（第9図）。これらの土層は改変に伴う圧密を受けており、乾燥密度にして元の表土が約1.2倍、元の下層土が約2倍になるほどの強い圧密を受けたと推測される（第4図）。観測圃場における間隙率の鉛直分布はこの圧密の影響が反映されたもので、地表面から深度40cmにかけては、根系が集中している地表面付近を除いて60%前後と極めて小さいのに対し、深度40～80cmでは70～80%と大きくなっている。また、これらの深度では採取時ごとのばらつきが小さくなったが、この理由としては改変以前の土壤で既に進んでいた土壤生成作用に加え、土壤改変に伴う人為的な均質化の効果も考えられる。深度80cm以深には改変の影響はそれほど及んでおらず、間隙率の分布もアカマツ林とほぼ同じであり、その形成要因も同様の理由によると推察される。

観測圃場の土壤の透水・保水特性も間隙率と同様、改変に伴う圧密の影響を強く受けている（第6図および第8図）。草本類の根系が密に分布し、ある程度の土壤生成が進んでいる地表面付近においては、飽和透水係数・水分特性曲線ともアカマツ林の土壤表層と同様の結果を示した。これに対して深度10～40cmでは、もともと透水性が低く保水性が高かつ

た下層土が強い圧密を受けたことによって、飽和透水係数はプロファイル中最小となり、水分特性曲線はほとんど排水を生じず極めて高い保水性を示した。客土された粘土層についても、分析の結果を見る限り元の下層土と類似した透水・保水特性を示している。これとは逆に、もともと透水性が高く保水性が低かった表土が埋積している深度40~80cmにおいては、それほど強い圧密を受けなかったこともあり、透水性は比較的高く、保水性は比較的低く保たれている。深度80cm以深については、間隙率と同じくアカマツ林と同様の結果となった。

以上の結果を踏まえて観測圃場の土壤を透水・保水特性の異なる土層に分類すると、1) 改変後の土壤生成が進んでいる深度0~10cm、2) 強い圧密を受けた元の下層土および客土された粘土層からなる10~40cm、3) 元の表土が若干の圧密を受けた40~80cm、4) 改変の影響をあまり受けていない80cm以深、の4層に分けられる。これに対して実測された野外における体積含水率の鉛直分布は、1) では40~50%と小さく、2) ではほぼ飽和し、3) では逆に気相率が最大で約10%に達し、4) では気相率が深度とともに減少、というように透水・保水特性による土層分類に極めてよく対応した分布を示した(第3図)。このことから、観測圃場の土壤における体積含水率分布の形成には、土壤改変に伴う圧密の影響が極めて大きいことが示された。

## V まとめ

筑波大学水理実験センター内のアカマツ林および熱収支・水収支観測圃場の土壤について、試料の採取・分析を行い、それぞれの土壤の物理特性を明らかにした。分析によって、土壤の三相分布、各深度における乾燥密度・真比重・飽和透水係数および水分特性曲線が求められた。また、得られた分析値に基づく解析の結果、以下の事実が示された。

- 1) 観測圃場における土壤改変の実態を乾燥密度を用いて定量的に評価した結果、深度0~25cmには元の50~100cmの下層土が、40~80cmには元の0~50cmの表土がそれぞれ埋積していた。また、

深度80~125cmの土壤は元の100~150cmの土壤が5cm程度の圧密を受けたもので、土層全体が受けた圧密によって現在の土壤は元の土壤に比べて地表面の標高が25cm低下していた。

- 2) アカマツ林の土壤はその透水・保水特性により、深度70cmを境に、透水性が深度に対して急激に減少し保水性が比較的低い土壤表層と、透水性が緩やかに減少し保水性が高い土壤深層とに分類された。実測された体積含水率の分布はこれらの特性の違いによく対応していた。
- 3) 観測圃場の土壤はその透水・保水特性により、主として土壤改変に伴う圧密の程度によって4つの層に分類された。実測された体積含水率の分布は各層におけるこれらの特性を極めてよく反映しており、体積含水率分布の形成に関する圧密の影響の大きさが示された。

## 謝 辞

本研究における土壤試料の採取および各種土壤試験は、筑波大学第一学群自然学類開設の水文学実験の授業において、受講された学生の方々のご協力のもとに行われました。筑波大学水理実験センターのスタッフの方々には、同センターを利用するに当たり様々なご便宜を頂きました。地球科学研究科の井岡聖一郎氏ならびに環境科学研究科の小野孝也氏には、観測圃場における土壤断面調査にご協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

## 文 献

- 宇佐美哲之・及川武久(1993) : アカマツ林内の光微環境とシラカシ稚樹の成長特性. 水セ報, No. 17, 79-89.
- ウッドワード, F.I. 著, 内嶋善兵衛訳(1993) : 「植生分布と環境変化」. 古今書院, 205p.
- Woodward, F.I. (1987) : *Climate and Plant Distribution*. Cambridge Univ. Press.
- 杉田倫明・山下孔二・古藤田一雄(1986) : アカマツの形態構造. 水セ報, No. 10, 47-52.
- ヒレル, D. 著, 岩田進午監訳(1984) : 「土壤物理学概論—土と水の科学—」. 養賢堂, 288p.

- Hillel, D. (1971): *Soil and Water: Physical Principles and Processes*. Academic Press, New York.
- 安井弓子・及川武久 (1993) : 筑波大学構内アカマツ林床における土壤呼吸速度と微気象環境の日変化・季節変化特性. 水セ報, No. 18, 77-91.
- 劉夏・及川武久 (1993) : 水理実験センター草原生態系の現存量と種別の季節変化と環境条件. 水セ報, No. 18, 69-75.
- Gash, J.H.C., Nobre, C.A., Roberts, J.M. and Victoria, R.L. (1996): *Amazonian Deforestation and Climate*. John Wiley, Chichester, 611p.
- Indra, A.R.F., Tanaka, T. and Hamada, Y. (1997): Soil water dynamics in natural pine forest and disturbed grassland. In: *Proceedings of International Workshop on Global Change and Terrestrial Environment in Monsoon Asia*, 91-94.