

地形情報と土壌の物理性

三 浦 健 志*

Topographical information and soil physical conditions

Takeshi MIURA

Faculty of Agriculture, Okayama University

I はじめに

傾斜地では、地形が複雑なため、わずかに距離が隔たっても植生をはじめとする地表の状態に大きな差異がみられる。土壌水分量、粒径分布、土壌温度などの土壌環境もそれにたがわず、場所、斜面の部位などにより大きく異なることが確認されている。本論文では、このような傾斜地での土壌の諸環境の場所的差異が地形情報（主として地表面の曲率）と深い関係があることを、実測値をもとに、次の手順に従って明らかにする。データ等は奈良県五条市の山成り造成樹園地での観測結果を引用する。

◦斜面や斜面の部位による土壌環境の相違を概観する。

◦地表面の曲率という概念を導入して、尾根・谷といった定性的な地形表現の定量化を図る。

◦地形図から地表面の曲率およびその分布を計算する簡単な方法を示す。

◦日射量が土壌の水分環境に及ぼす影響をみる。

◦尾根と谷での土壌水分量の差異が傾斜地の熱収支構造を特徴づけていることを示す。

以上のようにして、傾斜地の土壌水分量と地表面の曲率との関係を中心に、地形情報と土壌の物理性との関係を論じる。

II 調査圃場の概況と土壌環境測定地点の配置

調査は、Fig.8 に示す奈良県五条市南部の椋辻畑地灌漑モデル圃場で、1976年から1979年にかけて行った。椋辻モデル圃場は、標高320~380m、傾斜5~35°、山成り工で造成され造成当初から30数年が経過している。植栽状況は、樹令5~35年生、平均樹高3.5mの柿が植えられている。谷部にはプラム、また幼木のところにはみょうがも合せて栽培されている。Fig.8中のNo.1~24、A~Dは土壌水分量をはじめとする土壌環境・土壌の物理性の測定地点である。

III 斜面や斜面の部位による土壌環境の差異

Fig.8のA、B、C、D地点をそれぞれ斜面上・中・下部、谷部と位置づけて土壌環境の測定が行われた。その測定結果を以下に示す。なお、調査地区の土壌は真比重が2.7前後、塑性図から中圧縮性無機質シルトであることが確認されている¹⁾。

1. 粒度組成

斜面の部位の異なる三地点（A、B、C地点）の土壌（開畑後20年経過）と開畑直後の土壌（原土）の粒径分布（赤江ら；1977）¹⁾にNo.6地点の土壌の粒径分布を加筆してFig.1に示す。斜面上部から中部、下部へと斜面を下るにつれて、粒径加積曲線は左へすなわち粒径が細かい方へよっている。これは、微細粒子の含有率が斜面を下るにつれ増加していることを示している。

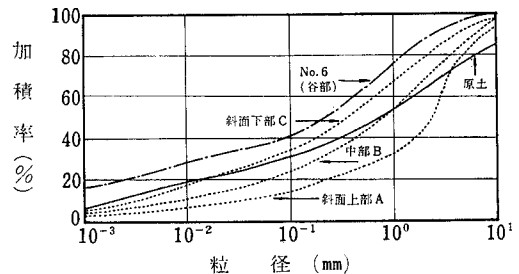


Fig. 1 粒径分布状況

2. 仮比重の鉛直分布

斜面の各部位における仮比重の深さ方向の変化をFig.2に示す（赤江ら；1977）¹⁾。表層は部位によらず、仮比重は小さく、間隙率が高いことを示している。谷部では下層まで仮比重が小さいのに対し、斜面上部・下部では深さが増すにつれ仮比重は大きくなっている。すなわち、間隙率の大きい（土壌構造がよく発達した）土壌の土層厚は、斜面上・下部では薄い、谷部ではかなり厚くなっていることがわかる。

* 岡山大学農学部

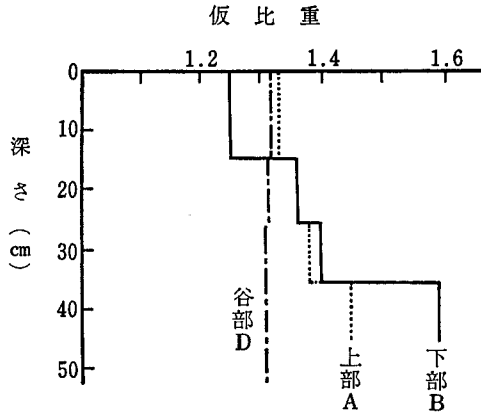


Fig. 2 仮比重の深さ方向の変化

3. 土壌水分張力の経日変化

テンシオメーターによって測定された 20 cm 深さでの pF の変化が Fig.3 に示されている (三野; 1978)²⁾。斜面上部では pF の変化幅が大きく、乾燥時には最高 pF 2.8 まで上っている。それに対して、同時期、斜面下部では pF は 2.4 程度しか上昇していない。このように斜面下部では上部に比べ、湿潤状態にあることがわかる。

4. 土壌水分プロフィールとその変化

土壌水分プロフィールを中性子水分計の計数値で表したものが Fig.4 である (三野; 1978)²⁾。計数値は土壌の体積含水率に比例すると考えられる。なお、使用された中性子水分計の水中の計数値は約 18000 cpm である。1977年 7月13日の水分プロフィールは右側の曲線で、7月18日のそれは左側の曲線で表されており、その間の斜線で示されている部分が7月13日から7月18日の5日間に減少した水分量を示している。これを見ると、谷では表層のみで水分量が減少しているのに対して (表層消費型)、斜面上部では全層にわたって水分量の減少がみら

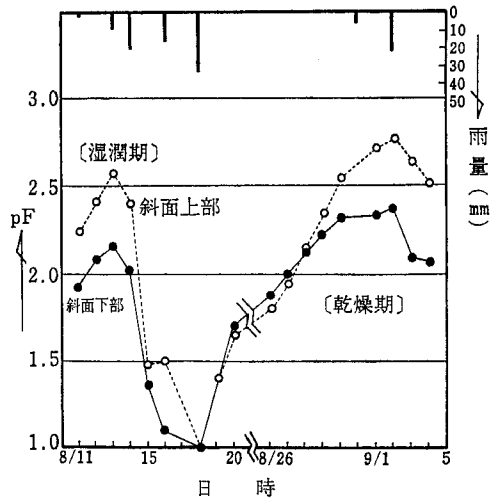


Fig. 3 土壌水分張力の pF の経日変化

れる (全層消費型)。また、水分量の勾配から推測すると、斜面上部ではさらに深層への水分移動が、谷部では深層から表層への水分移動の存在が予想される。

5. 地表面近傍の温度環境と日射量との関係

1978年11月6日の No.1~7 地点における 7:00~17:00 の平均地温 (2 cm 深さ)、平均気温 (50 cm, 150 cm 高さ) をその地点の受ける 1 日間の日射量に対してプロットしたのが Fig.5 である (三浦ら; 1980)³⁾。地表面近傍の温度環境は斜面により大きな差異があり、平均地温はその地点の日射量と指数曲線的関係を示し、平均気温は日射量と直線関係を示す⁴⁾。このように、日射量は地表面近傍の温度環境に大きな影響を及ぼしており、とくに傾斜地では日射量は場所により大きく異なるため、地表面近傍の温度環境を考える場合地表面の受ける日射の大小に注意を払う必要があるであろう。

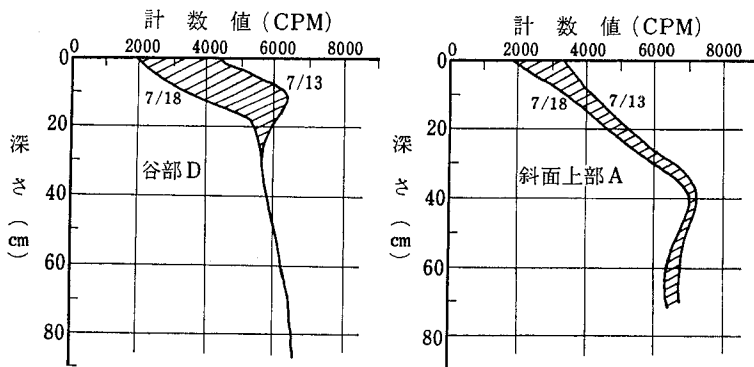


Fig. 4 土壌水分プロフィールとその変化

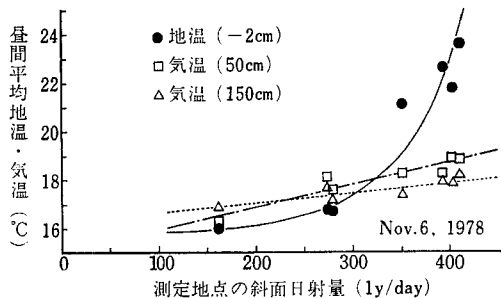


Fig. 5 昼間平均地温・気温と測定地点の斜面日射量との関係

IV 地表面の曲率による地形の定量化

以上を参考にして、表層の土壌環境・物理性をまとめると次のようになる。

粘土やシルトなどの微細土壌粒子が雨水の流出とともに斜面の上部から下部へ流亡し、斜面下部や谷部では微細粒子の含有率が高くなり、逆に上部ではレキ分が増加する。また間隙率の高い土層は上部で薄く谷部で厚くなる。それにともない、保水性は谷部で大きく斜面上部・尾根で小さくなる。このように谷部では受皿である土壌の保水性もよく、さらに重力により水分も（地表水、土壌水分とも）流入してくるのでなお一層湿潤となる。また、尾根や斜面上部ではこれと全く逆の傾向を示す。かくして傾斜地では尾根と谷といった両極の水分環境を示す地域に分化してゆくと考えられる。

以上の説明は尾根・谷で代表される斜面の部位による土壌環境・物理性の違いを定性的に述べたものである。一步進んで、傾斜地の様々な物理現象を定量的に明らかにするには、どこまでが尾根であり谷であるのか、またその程度をどの様に表現するのかといった地形に対する客観的な評価尺度が必要となってくる。

1. 地表面の曲率と水分・物質収支

地形に対する客観的な評価尺度を得るため、地表面の曲率という概念を導入すればよいと考える。ある地点の水分・物質収支は、上方からの流入量と下方への流出量の差として表される。上方からの流入量は上方斜面の勾配により、下方への流出量は下方斜面の勾配により表されるとすると、流入量の差である収支はその地点の地表面の勾配の変化率である曲率 ($\nabla^2 Z = \text{div}(\text{grad } Z)$, Z : 標高) に比例すると考えられる⁵⁾。この地表面の曲率と水分・物質収支の概念を示すと Fig.6 のようになる (MITSUNOら; 1980)⁵⁾。 $\nabla^2 Z < 0$ のところは地形が凸なところを、 $\nabla^2 Z > 0$ のところは凹なところを表し、 $\nabla^2 Z = 0$ は変曲点を表す。水分・物質収支からみると、 $\nabla^2 Z < 0$ のところは支出過多、 $\nabla^2 Z > 0$ のところは収入過多となる区域を表し、 $\nabla^2 Z$ の絶対値の大小によりその傾

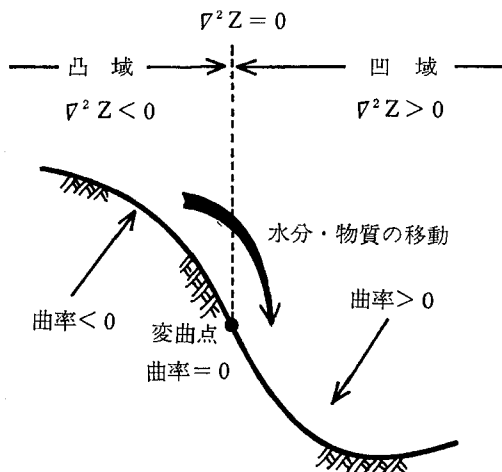


Fig. 6 地表面の曲率と水分・物質移動の概念図

向の程度を知ることができる。以上のことは実測値からも確認されている^{5), 6)}。

2. 地表面の曲率の求め方

地表面の曲率を表す $\nabla^2 Z$ は、Fig.7 のように地形図をメッシュに切ってその節点の標高から(1)式により計算することができる。

$$(\nabla^2 Z)_0 = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 - 4Z_0) / (\Delta X)^2 \dots\dots(1)$$

ただし、 $(\nabla^2 Z)_0 = 0$ 地点での標高のラプラシアン、 $Z_n : n$ 地点の標高、 ΔX : 格子間隔

3. 地表面の曲率分布の計算例

徑辻モデル圃場の地形図を格子間隔 20 m, 東西方向 22, 南北方向 25 の正方形メッシュに分割し、その節点の標高から前述の方法により、各節点の $\nabla^2 Z$ を計算した。Fig.8 は、その計算結果をもとに、 $\nabla^2 Z = -0.02, 0.02 \text{ m}^{-1}$ を表す曲線により地域を三分割した曲率区分図である。 $\nabla^2 Z < -0.02 \text{ m}^{-1}$ の区域は負の曲率が大きい凸域を、 $\nabla^2 Z > 0.02 \text{ m}^{-1}$ の区域は正の曲率が大きい凹域を、 $-0.02 < \nabla^2 Z < 0.02 \text{ m}^{-1}$ の区域は曲率が小さい凹凸の

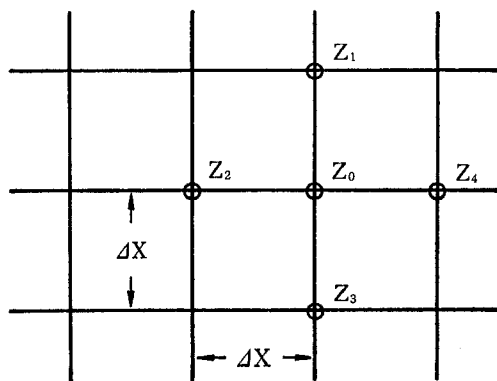


Fig. 7 標高のラプラシアン $\nabla^2 Z$ の近似法

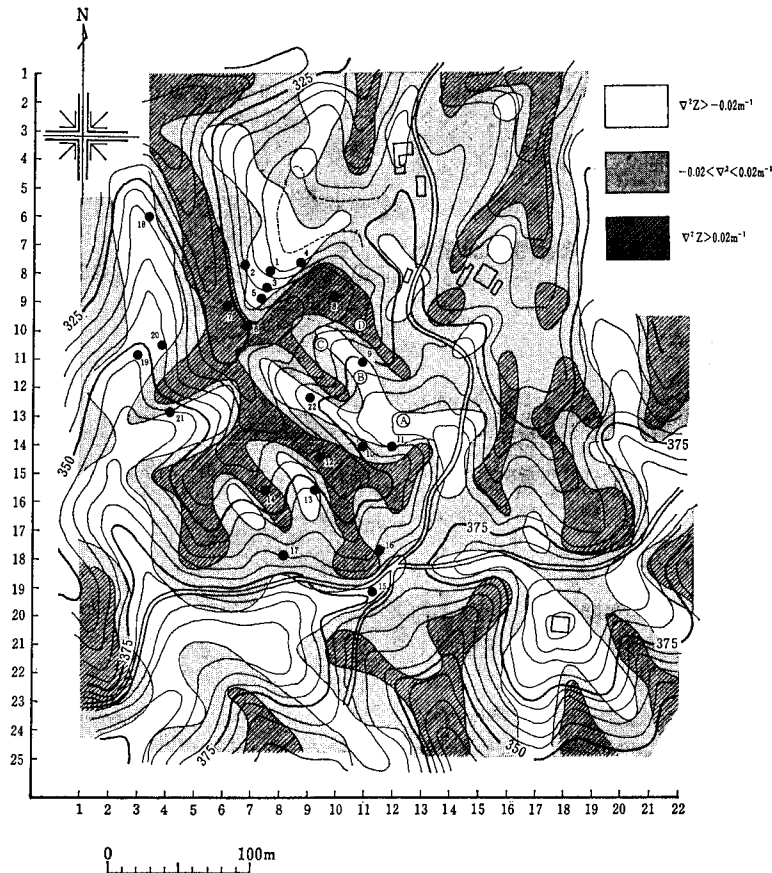


Fig. 8 観測点の配置と地表面の曲率分布 (五条樫辻モデル圃場)

中間域を表している。凸の程度の大きい区域は尾根すじ、斜面上部などと、凹の程度の大きい区域は谷や谷すじと表現されている区域とよく対応していることがわかる。このように、従来定性的に尾根、谷、斜面のどこそこと表現されていたものが、地表面の曲率を導入することにより定量的かつ面的な地形表現が可能になることがわかる。

V 地表面の曲率と土壌水分量との関係

つぎに、観測圃場内20数地点の地表面の曲率とその地点の土壌水分量との関係を検討する。

土壌水分量は、100 cc サンプラーにより表層土 (約 2 ~ 7 cm 深さ) を採土し、炉乾法により求めた。1978年 11月10日の24地点の土壌水分量 (Wc: 体積含水率) と測定地点の地表面の曲率 ($\nabla^2 Z$) との関係を示すと Fig.9 のようになる。 $\nabla^2 Z$ の増加とともに体積含水率は増加しており、直線で近似すると回帰式は $Wc = 404 \cdot \nabla^2 Z + 36.1$ 、相関係数 $r = 0.892$ となり、非常によい直線関係があることがわかる。また、1979年 8月29日におけるほぼ同地点での体積含水率と $\nabla^2 Z$ の関係は $Wc = 268 \cdot$

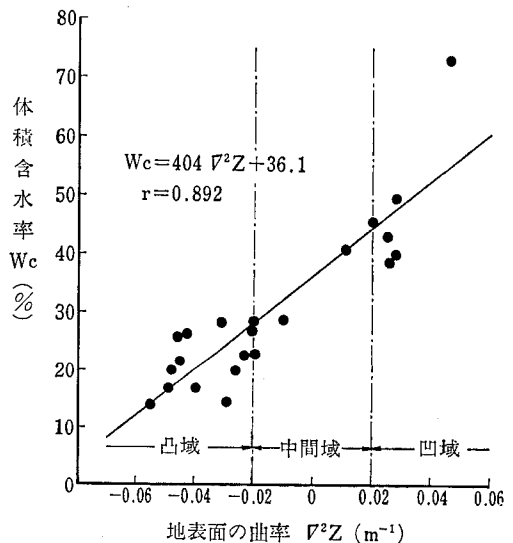


Fig. 9 地表面の曲率と土壌水分量との関係

$\nabla^2 Z + 35.0$, $r = 0.909$ となった。岡山大学農学部津高牧場での測定においても同様に比較的良好な直線関係をえ

ている⁶⁾。

以上の結果から、土壌水分量は地表面の曲率と相関が高く、地表面の曲率を計算することによりその地域のおおよその土壌水分量の分布が推定できることがわかる。すなわち、Fig.8 の曲率区分図はこの地域の土壌水分量の分布を表現していると考えられる。

VI 地表面の曲率および日射量と土壌水分量との関係

1. 日射量と土壌水分量との関係

土壌水分量は、他の条件が一定とすると、インプットエネルギーであるその地点の受ける日射量と強い相関を示す。それゆえ、土壌水分量をその地点の斜面日射量に対してプロットすると、土壌水分量は日射量に対して負の相関をもつはずである。そこで、測定した土壌水分量をその地点の斜面日射量*に対してプロットすると Fig.10 のようになる(三浦ら; 1981)⁷⁾。プロットはかなりばらつき、土壌水分量は日射量のみ関数でないことが伺える。しかし、土壌水分量の測定地点が、Fig.8 に示したように、曲率の程度により分割した三つの区域(凸域、中間域、凹域)のどこに位置するかで色分けすると、図のようにプロットはきれいに分類される。重力の斜面の傾斜方向分力による水の流入量と流出量が等しくなる $\nabla^2 Z = 0$ 付近の中間域では、土壌水分量は日射量の負の勾配をもつ1次関数として表される。そして、この中間域を示すプロットを貫く直線(図中の実線)の上部(土壌水分量が多い側)に凹域、下部に凸域を示すプロットがくる。このように、傾斜地の土壌水分量の場所的差異は、その地点の受ける日射量と地表面の曲率により明快に説明される。なお、土壌水分量と斜面日射量との関係を直線で近似すると、11月10日: $Wc = -0.0543 \cdot R_{day} + 43.1$

$R_{day} + 43.1$, $r = -0.452$, 8月29日: $Wc = -0.0842 \cdot R_{day} + 56.1$, $r = -0.388$ (R_{day} : 日射量, ly/day) となり Fig.10 中に破線で示してある。

同時刻の太陽高度は1979年8月29日(夏期)が1978年11月10日(秋期)に比べて高く**、その結果日射量のコントラストは夏期では弱く秋期では強く現れる^{8),9)}。そのため日射量は地域平均で11月10日が約 240 ly/day, 8月29日が約 310 ly/dayであるが、分布幅は11月10日には約50~400 ly/day とかなり幅があるのに対し、8月29日には約 230~360 ly/day と分布幅は狭くなっている。また、測定日前10日間の先行降雨量は11月10日7.5 mm, 8月29日 90.0 mm と後者がかなり多い。これらの結果が土壌水分量の分布状況に反映している。このように先行降雨は8月29日の方がかなり多いが、22地点の平均土壌水分量は、8月29日 30.7%, 11月10日 30.2% とほとんど同様な値を示している。これは地域平均日射量も8月29日の方がかなり多く、先行降雨の多い分を補い、結果として同じような平均土壌水分量を示したためであろう。土壌水分量の分散は、8月29日 78.4, 11月10日 199.8 と8月29日の方がかなり小さくなっている。これは、日射量分布が秋期にはかなりコントラストがつかのに対し、夏期には均一である⁸⁾ ためと考えられる。

2. 地表面の曲率および日射量と土壌水分量との重相関関係

以上より、土壌水分量の場所的差異は地表面の曲率とその地点の受ける日射量により説明できることが明らかになってきたが、つぎにどの程度説明できるかをみるために、1978年11月10日における、地表面の曲率および日射量と土壌水分量との重相関関係を調べた。なお、比較検討のため土壌水分量と地表面の曲率、土壌水分量と日射量との単相関関係(回帰式)を併記する。

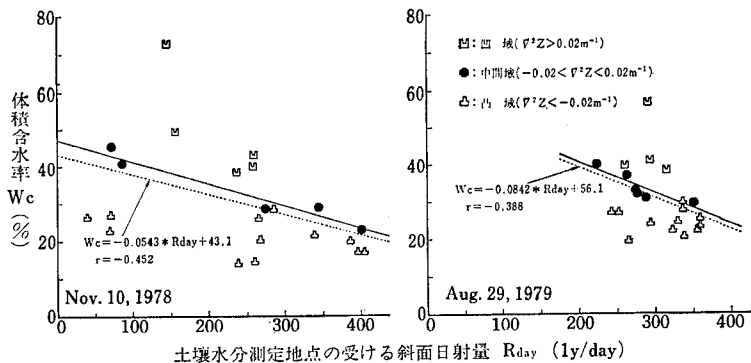


Fig. 10 土 壌 水 分 量 と 測 定 地 点 の 受 け る 斜 面 日 射 量 と の 関 係

* 土壌水分量に影響を及ぼすものは測定日以前何日間かの積算日射量と考えられるが、ここでは、その時期の各地点の受ける日射の大小の定性的傾向を示す指標として、土壌水分量測定日の斜面日射量をとりあげ土壌水分量との関係を調べた。

** 赤緯は1978年11月10日: $-16^{\circ} 59'$, 1979年8月29日: $+9^{\circ} 39'$ である。

$$Wc = 379 \cdot \nabla^2 Z - 0.0187 \cdot R_{day} + 40.2$$

$$R = 0.904 \quad R^2 = 0.817$$

$$Wc = 404 \cdot \nabla^2 Z + 36.1 \quad r = 0.892 \quad r^2 = 0.795$$

$$Wc = -0.0543 \cdot R_{day} + 43.1 \quad r = -0.452 \quad r^2 = 0.204$$

ただし、Wc：体積含水率(%), $\nabla^2 Z$ ：標高のラプリアン(m^{-1}), R_{day} ：各測定地点の受ける日射量(1y/day), R, r：重, 単相関係数

これらの結果をみると、土壌水分量の場所による差異は地表面の曲率単独でかなりの程度説明できることがわかる($r^2=0.795$)。さらに、説明変数に日射量を加えると寄与率は $R^2=0.817$ へと上昇する。傾斜地の日射量分布は、別報⁹⁾に示すように、主として地形と太陽との位置関係から計算により求めることができる。放射環境を一定とすれば、日射量分布は、地表面の曲率とともに、地形図の標高データ(地形情報)を解析して得られるものである。これらのことより、傾斜地の土壌水分量の分布は地形情報からかなり精度よく推定できるものと考えられる。

Ⅶ 傾斜地の熱収支構造

つぎに、水分環境において両極の性質を示す尾根と谷での熱配分をとおして、傾斜地の熱収支構造を検討する。

土壌水分量の少ない尾根(No.1)と多い谷(No.6)での熱収支法により求めた昼間の熱収支状況を示すとTable 1 のようになる(三浦ら; 1981)⁷⁾。

純放射量を100としたときの潜熱伝達量は、11月10日尾根29, 谷55, 8月29日尾根53, 谷62と尾根と谷では顕著な差があり、11月10日と8月29日との間にも大きな差がみられる。この差の原因は、土壌水分量に代表される地表の湿潤状態にあることは自明であろう。これらを参考にして、傾斜地の熱収支構造を降雨後の熱収支の変化として図にまとめると Fig.11 のようになる(三浦ら; 1981)⁷⁾。図にも示したように、傾斜地の熱収支構造は、地表の湿潤状態の違いにより、尾根では顕熱伝達が、谷では潜熱伝達が重要な熱放出現となる大きな特徴

である。

傾斜地では、このように狭い地域内に熱収支状況が異なる地点が混在している。地表面での熱収支は地表の湿潤状態(土壌水分量)と地表面の受ける日射量により大きな影響を受けており、それゆえ傾斜地では、熱収支構造もまた地形情報により評価が可能であろう。

Ⅷ おわりに

傾斜地においては、土壌環境・物理性のなかでもとくに土壌水分量は、地形に応じてかなり差があること、その場所的差異を地表面の曲率により定量的に表現できること、さらに、地表面の曲率は地表の湿潤状態を介して地表面での日射エネルギーの配分にも大きな影響をもつことを示してきた。

このような傾斜地での土壌環境等の計測は、場所により種々の環境が大きく異なるので、計測地点の位置付けを確認してから行う必要があると思われる。その際、ここで示した地形図から得られる曲率区分図が大いに役立つと考えられる。リモートセンシングなど空中写真等に

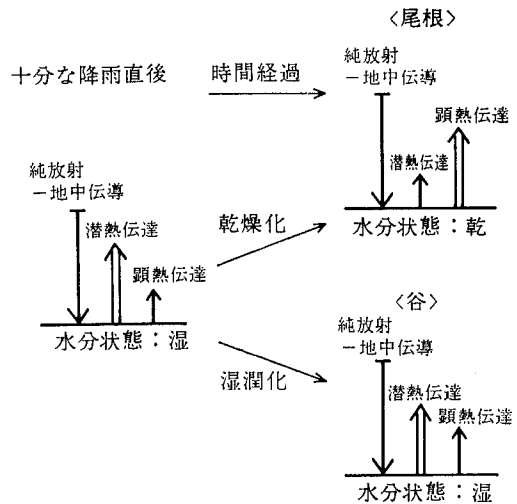


Fig. 11 傾斜地の熱収支構造 (降雨後の熱収支の変化)

Table 1 尾根と谷の熱収支の比較

		S (1y)	B (1y)	LE (1y)	F (1y)	β	Wc (%)	Epan (1y)	ET _{penman} (1y)	R _{day} (1y)
Nov. 10, 1978 (8:00—15:30)	尾 根	194.6	7.5	56.5	130.6	2.31	16.9	172.9	137.5	319.4
	谷	186.0	7.2	103.4	75.4	0.73	39.8	90.2	124.5	257.3
Aug. 29, 1979 (6:40—17:50)	尾 根	261.0	13.9	137.3	109.8	0.80	25.5	225.4	213.6	347.2
	谷	270.4	24.9	167.0	78.5	0.47	41.3	191.9	203.6	293.1

S：純放射量, B：地中伝導量, LE：潜熱伝達量, F：顕熱伝達量, β ：ポーエン比(=F/LE) Wc：体積含水率, E_{pan}：小型蒸発計蒸発量, ET_{penman}：ペンマンの蒸発散位, R_{day}：1日間の日射量

よる地形の解析においては、とくに対象が傾斜地の場合は、斜面の勾配、方位、標高に加えて、斜面の勾配の変化率である曲率を導入されんことを期待する。

本調査対象の圃場では地表面の曲率と土壌水分量との間に高い相関が認められたが、この手法をそのままより広い地域や異なった土性の混在する場所に適用するには様々な問題がある。

また、ここではふれなかった植生の影響、母材の差異などはもちろん土壌の諸環境に大きな影響を及ぼすものであり、今後検討しなければならない課題である。さらに、地形の凹凸状況をよりよく表現するためにメッシュ間隔の検討も必要となろう。

引用文献

- 1) 赤江剛夫, 三野 徹, 丸山利輔: 傾斜地の水文環境による土壌物理性の変化, 昭和52年度農業土木学会大会講演要旨集, pp. 220~221 (1977)
- 2) 三野 徹: 傾斜開畑地における熱・水配分構造と土壌の物理性, 土壌の物理性, 37, pp. 22~28 (1978)
- 3) 三浦健志, 四方田穆, 三野 徹, 丸山利輔: 傾斜地に形成される局地気象と農地開発 (IV) 一日射量分布と地温分布特性一, 昭和55年度農業土木学会大会講演要旨集, pp. 232~233 (1980)
- 4) 三浦健志, 三野 徹, 丸山利輔, 四方田穆: 日射量と地温・気温・計器蒸発量との関係—傾斜地における温度環境形成機構に関する研究 (II)—, 農土論集, 89, pp. 1~6 (1980)
- 5) Mitsuno, T., D. Zaslavsky & T. Miura: Soil water distribution in mountainous area and irrigation planning, Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan, No. 42, pp. 2~8 (1980)
- 6) 三浦健志, 四方田穆, 岩田浩一郎: 傾斜地の土壌水分分布一日射量と地形の曲率からみた地域区分一, 昭和57年度日本農業気象学会大会講演要旨集, p 75 (1982)
- 7) 三浦健志, 三野 徹, 丸山利輔, 四方田穆: 傾斜地の熱収支構造—傾斜地における温度環境形成機構に関する研究 (III)—, 農土論集, 95, pp. 1~10 (1981)
- 8) 三浦健志, 三野 徹, 丸山利輔, 四方田穆: 傾斜地の日射量分布計算法—傾斜地における温度環境形成機構に関する研究 (I)—, 農土論集, 88, pp. 1~7 (1980)

質 疑 応 答

宮崎 (四国農試) 透水性は尾根や谷について違いがあるのか。この情報を農作物に応用する場合、作物にとって尾根がいいのか、谷がいいのかを評価する際にど

う役立つであろうか。

三浦 透水性は測定していないが、この土地は頁岩のような母岩がへき開しながら風化し、微細粒子分が雨とともに流下して、図示 (Fig.1) したような斜面部位により異なった粒径分布ができたと考えられる。この粒径加積曲線から透水性は尾根の方が大きく谷の方が小さいことが想像される。曲率分布図からは、地表の水分状態を知ることができる。五条のカキ園ではカキは湿気を嫌うため、谷の方ではプラムなどになっておりカキが少ない。Fig.8の曲率分布図では、 $\nabla^2 Z > 0.02 \text{ m}^{-1}$ である凹地域がプラムなどの多い場所と一致している。このように水分状態を介して、乾燥や湿潤に対する強弱から作物の適地判定に応用できよう。また灌漑を行う場合、乾燥傾向の強い区域に多く散水するなどの強弱をつけた灌漑により節水が図られよう。

須藤 (茨城大) 傾斜と含水比の相関は検討しているか。

三浦 やっていない。同じ傾斜でもその場所が谷であるのか尾根であるのかで水分量が異なる。さらに水分収支に影響を及ぼすものは斜面の傾斜ではなくその変化率と考えられるので土壌水分量の場所による差異を曲率でとらえようとした。

岩佐 (農技研) 標高との関係をどう考えるか。同じような谷でも標高に差があると、雲の流れなどの影響で土壌水分量に違いがでるのではないか。谷密度の大きい場合と小さい場合は同じように考えていいのか。

三浦 標高が何百mも変われば土壌も変わるであろう。曲率で説明できるためには土性が均一でなければいけない。農地造成地を対象とし、ある区域内での土壌水分の多少を問題にしたので、標高については検討していない。ある与えられた地形の中での土壌水分分布を検討しているので、広い地域全体での検討は行っていない。

寺沢 (農技研) 国土保全の関係で地すべりや崩壊、エロージョンと曲率の相関は有効であると考えるか。

三浦 土粒子の流れとして、崩壊、エロージョンを考えれば水分と同様に取り扱えるのではないかと考えている。私の少ない経験では、牧場での表層の崩壊は曲率が負から正への変換点で発生することが多い。

木下 (土壌協会) 地形と土壌の性質の関係は、簡単ではないのではないかと。地形が原因で諸性質の異なる土壌ができて、水分などが違ってくる。ここでは土壌の水分状態を曲率でみるといいと言うが、その間に土の性質を定量的に把握しその関係をみる必要がある。したがって、次の段階としては土の性質をコンピュータするようなことをやられるとよからう。

三浦 今後の参考にさせていただく。