

地形情報を用いた圃場内における土壌の空間変動の解析

柏木 淳一*

Identification of the Spatial Variability of Soil Properties Using Terrain Analysis

Junichi KASHIWAGI*

* Hokkaido University Graduate School, Kita-9, Nishi-9, Kita-ku, Sapporo 060-8589, Japan

はじめに

土壌は周辺の環境に応じ局所的に変化する自然物である。土壌生成には5つの因子が複合的に作用しているが、局地土壌の生成については地形因子が優勢となり、その分布を推定するのに地表面の起伏が重要となることが知られている。一連の斜面に見られるカテナ、つまり土壌断面形態が地表面の傾斜度と対応した変化することは、その一例である。斜面上の土壌の変化や分布の形成には、傾斜地特有な物質移動現象が深く関与している。土砂自体の直接的な移動形態として、重力によるブリープ**やソリフラクション***、風力や水力による土壌侵食や堆積があげられる。さらに耕地では、重力による土壌粒子の斜面下方への移動が、耕耘時に生じることが報告されている (Van Oost *et al.*, 2000)。また先の侵食・堆積あるいは成分の溶脱・集積現象を引き起こす水移動の方向やその程度、凍結・融解や昇温・降温といった温度環境を規定する放射エネルギー量の多寡には、地形が多大な影響を及ぼしている。これらの作用の結果として形成された土壌断面の形態や様々な土壌の性質の分布特性について、斜面上の位置や地形の形態を考慮することで、明らかにできるケースが数多く報告されている (三浦, 1983, Woods and Schuman, 1988, King *et al.*, 1999, Pennock and Corre, 2001)。

農耕地は平野部から山間地にかけての広範囲な地形条件にわたり展開しており、圃場内においてもなにかしらの地形変化が認められる。一筆の圃場に限定した場合では、流域や連続斜面と比較してその面積が小さく、地形変化の程度は小さいものと考えられる。さらに耕地として利用するため、表層土は耕耘により均質化がはかられ、さらにはかきならしによる均平化のように地形変化

を小さくする手段が講じられている。また一方では、傾斜地を耕地として利用することに伴った土壌かく乱作用、耕耘などによる土壌構造の破壊や被覆率の低下によって土壌侵食が加速することは避けられず、局所的な侵食・堆積部位が形成されることも予想される。この様に耕地斜面では、土壌の分布形成に影響を与える地形因子の作用は未耕地斜面とは異なるが、圃場においては他の土壌生成因子が一様であるがゆえに、土壌分布を解析する上で地形変化を見極めることが重要であると推察される。特に土壌水分の移動に関しては起伏に鋭敏であり、小流域におけるハイドロカテナの形成や、地表面湛水量が微少な地表面の凹凸により支配されること (Hansen *et al.*, 1999)、数センチの高低差により地点間の浸透量が大きく異なること (Hasegawa, 1997) などが報告されている。

Miller *et al.* (1988) や Timlin *et al.* (1998) が明らかにした傾斜畑での地点間の作物生育状況の大きな差異は、年次ごとの気象条件によって変化するが、土壌の性状に起因するものであり、その分布を地形条件により説明している。このことは、圃場管理において地形情報が大切であることを示唆している。このような土壌のパラッキが大きく扱いにくい圃場においては、局所管理の概念が必要となってくる。まずは土壌を土地資源として正しく評価し、生産性を律する土壌の理化学性を明らかにして、その分布を簡便かつ正確に把握することが重要となろう。さらに耕耘による土壌劣化を抑制する対策として、また土壌改良によって期待される効果を得るためには、現状の土壌特性分布に基づいて行うべきである。ここでは、実際の傾斜畑における土壌特性の空間分布の実態を明らかにし、それらの分布特性を解析するにあたっての地形情報の有効性について検討した結果について報

* 北海道大学大学院農学研究科 〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

キーワード：傾斜農地、土壌の空間変動、地形解析、地形特徴量

** 凍結・融解や湿潤・乾燥の繰り返しによって、きわめて緩やかに集団として下方に移動する現象。

*** 水で飽和された土壌物質が斜面を上方から下方へ緩やかに流動する現象。

告する。

地形分類と定量化

これまでに斜面の形態的な特徴から、地形を評価し分類する試みが行われてきた。その中で注目すべき結果は Dalrymple *et al.* (1968) によってもたらされた。彼らは、傾斜地での詳細な土壌調査結果から、9つの基本単位(モデル斜面)に分類することを提案しており、それぞれの単位斜面上で生じている主要な土壌物質や水の移動形態について論じている。そして実際の地形はこれらの組み合わせにより再現できるとしている。相対的に急峻な我が国の地形に関しては、形態の連続性(遷急線、遷緩線など)からおおよそ12の微地形単位に分類されることを田村と吉永(1996)が提案し、実際の地形に対して適応している。彼らの分類基準に共通して言えることは、単に地形形態だけに基づいたものではなく、地形発達のプロセスや物質の動きを考慮して整理していることである。

また地形の形態を定量化する試みとして、Evans(1980)は正方格子の高度データ(DEM(Digital Elevation Model))から定まる5項を用いた2次の多項式で地表面を表した。その結果を受けて Zevenbergen and Thorne(1987)は9項による多項式に拡張し、適応性が良くなる

ことを見出した。正方格子のDEMの場合には、それぞれの定数項は高度とDEMの間隔から求まり、勾配や凹凸といった地形形態を定量化した地形特徴量を求めることが可能である。そして Moore *et al.* (1993) や Park *et al.* (2001) は、実際の傾斜畑における土壌特性の分布を明らかにした上で、地形情報との関係について検証している。

調査事例の紹介

傾斜普通畑 上富良野

調査圃場は、耕作を開始してから80年以上経過した約1.2haの古い傾斜地畑である。標高260m~295mの範囲にあり、北東向きの斜面で、15m/60mの主傾斜を持っている。また主傾斜と直交する方向には、3つの稜線と4つの谷線が連続する緩波状地をなしている。土壌は熔結凝灰岩を母材とする残積性酸性褐色森林土(Typic Dystrochrepts)で、風化層が浅く基盤が1m以内のみられる上富良野統に分類されている。

圃場全体を包括するように、基本間隔14mの正方格子の交点において土壌断面調査を行った。さらに畑の主傾斜を横切る方向と、主傾斜方向の稜線部付近と谷線部付近にトランセクトを設け、基本間隔の半分の距離7mごとに土壌調査を行った。計154ヶ所の土壌断面調査を

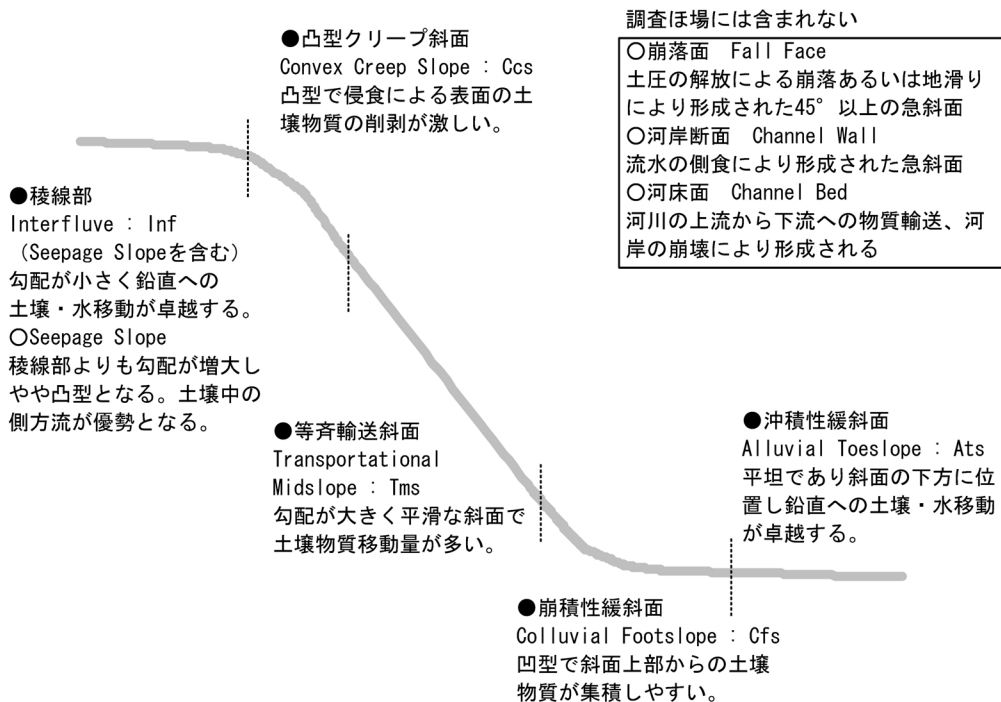
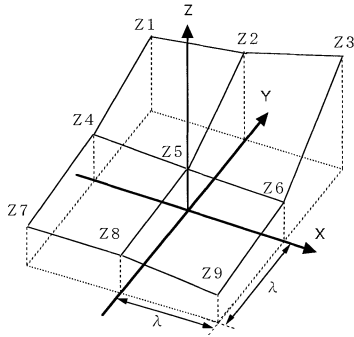


図-1 Dalrymple らが提案した斜面分類 (9-Unit) の概要とモデル斜面との対応

$$z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$



$$A = [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/4 + Z_5] / \lambda^4$$

$$B = [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)/4 - (Z_2 - Z_8)/2] / \lambda^3$$

$$C = [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)/4 - (Z_4 - Z_6)/2] / \lambda^3$$

$$D = [(Z_4 + Z_6)/2 - Z_5] / \lambda^2$$

$$E = [(Z_2 + Z_8)/2 - Z_5] / \lambda^2$$

$$F = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9) / 4\lambda^2$$

$$G = (-Z_4 + Z_6) / 2\lambda$$

$$H = (Z_2 - Z_8) / 2\lambda$$

$$I = Z_5$$

図-2 Zevenbergen and Thorne (1987) が示した地形特徴量の算出に関する概念図

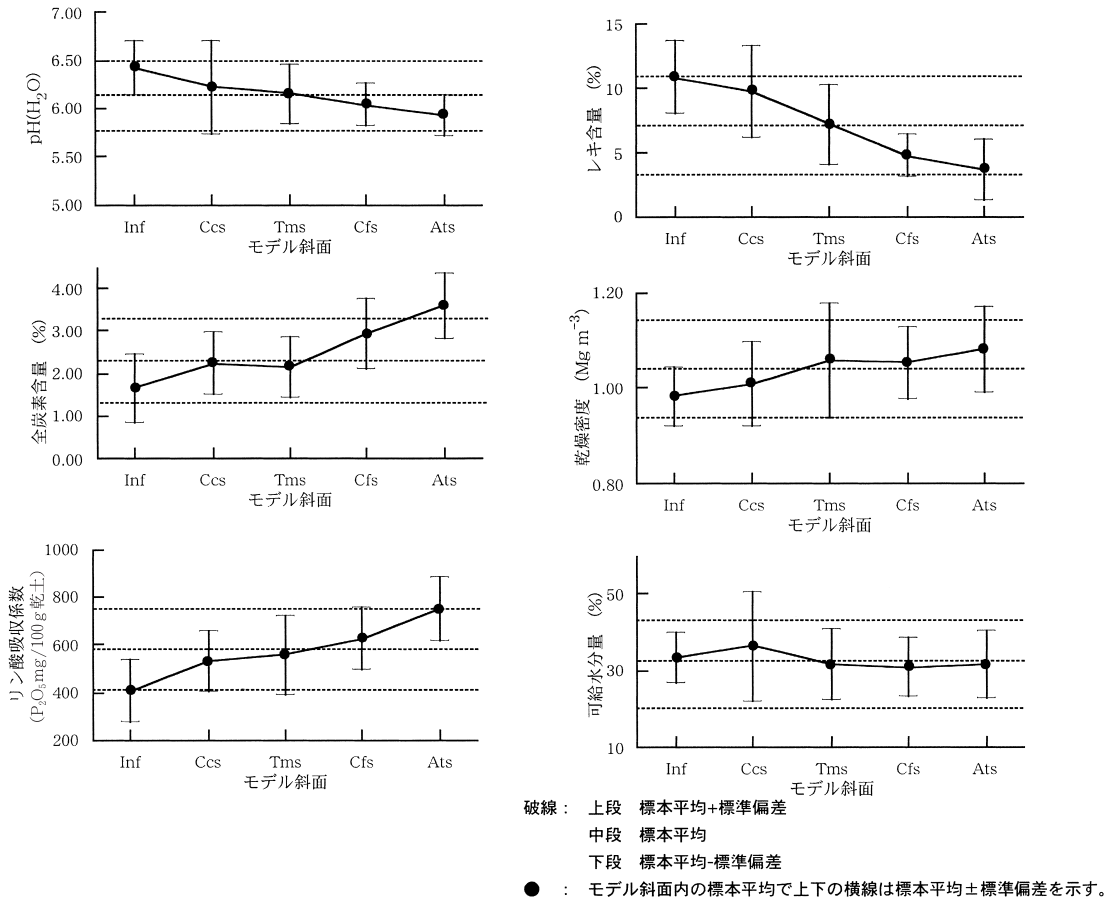


図-3 傾斜普通畑における土壌理化学性のモデル斜面による類型化

完了するには4日間を要した。断面調査は深さ80cmの試坑を設け、層位を分類し層毎に、土色やレキ含量を記載した。Ap層から土壌試料を採取し、実験室において乾燥密度、可給水分量、全炭素含量、粒径組成の物理性と、化学性としてpH、リン酸吸収係数を測定した。

地形解析は20m格子点ごとに現地測量によって補正した標高が示されている1/1000の地形図を用いた。この実測値と土壌サンプリングを行った格子に沿って基図上より7m間隔の標高を読み取り、DEMを作成した。そしてこのDEMを用いて、格子間隔が7mで、3×3の格子点の標高データを対象にZevenbergen and Thorne (1987)が導いた地形特徴量を算出した。表面流去水の集水度の指数となり、土壌水分の空間分布と強い関係を示す比流域 (Specific Catchment Areas) も測定し地形特徴量に加えた (Speight, 1980)。これは、測定地点での斜面長や流域面積に相当する指数である。また、地形図上の等高線の間隔や形状に、踏査による斜面の観察結果を加味して、モデル斜面に分類した。

結 果

深さ80cmの土壌断面で観察された層序は、斜面の頂部付近では激しい削剥によりB層の消失したAp/C、底部にかけては斜面上部から堆積したと考えられるAp/Ab/Bとなり、腐植層が斜面下方ほど厚層化する傾向が認められた。A層厚については、12.5~80.0cmの広い範囲にわたり変動しており、平均値が34.0cmで変動係数が39.7%とこれまでに報告されている結果の中でも大きな部類に属する。その確率密度分布については、 χ^2 検定により正規性が棄却され、20~35cmに60%のデータが集中し歪度が正で深さの増大する方向に向かって長いすそを持つ分布であった。これは侵食部分では耕耘など

の人為作用により一定の層厚が維持されるため下限値が限定されるのに対して、堆積部分では地形特性に応じた堆積により厚層化の度合いが大きく異なるためである。全サンプリング地点の分析データについて、理化学性ごとに統計量を算出しその結果を表1に示す。最も大きな変動を示したのは、変動係数が53%のレキ含量で、次いで変動係数が30%程度の全炭素含量、リン酸吸収係数、可給水分量、粘土、シルトであり、変動係数が10%程度のpH、乾燥密度、砂となり、おおよそ3つのグループに分類された。対象領域の増大により、土壌特性のパラッキ (変動係数) は増大することが知られており、既存の報告と対象面積を考慮して比較すると、ほとんどの土壌特性値について本調査圃場で得られた値は大きいものと判断した。なお変動係数によるグループごとの土壌理化学性に関しては、特定の傾向は見いだせなかった。確率密度分布に関しては、pH (H₂O) 以外の土壌特性について、正規分布あるいは対数正規分布とみなすことができた。土壌の粒径に関しては、粗粒画分であるレキ、砂含量は対数正規分布であるのに対して、細粒画分 (シルト、粘土含量) は正規分布と異なっていた。また可給水分量についても対数正規分布の適合が認められた。それぞれの土壌理化学性の変動性が大きいことに加えて、対数正規分布とみなせる特性値が移動特性 (透水係数など) 以外において認められることも、傾斜農地における特徴ではないかと考えられる。

Ap層の直下にC層となるAp/Cの層序では、Ap層は中粒質でありその土色は相対的に明度が高いことなどから、C層の材料を多く含んで構成されているものと推測された。つまり耕起・碎土・整地等人為的な作用によりAp層は一定の厚さを維持されるため、土壌侵食により表土が削剥された場合ほど下層土が混入する割合が増

表-1 傾斜普通畑における土壌理化学性の基本統計量

土壌特性	平均	標準偏差	分散	変動係数	標本数	確率分布*
A層厚 (cm)	34.0	13.50	182.19	39.7	154	—
pH (H ₂ O)	6.1	0.36	0.13	5.9	155	—
pH (KCl)	5.2	0.37	0.13	7.0	155	正規分布
全炭素含量 (%)	2.5	0.98	0.95	39.0	155	正規分布
リン酸吸収係数 (P ₂ O ₅ mg/100 g 乾土)	580.9	171.15	29293.86	29.5	155	正規分布
レキ含量 (%)	7.1	3.78	14.29	53.1	155	対数正規分布
乾燥密度 (Mg m ⁻³)	1.04	0.102	0.010	9.8	155	正規分布
可給水分量 (%)	32.8	10.41	108.37	31.8	155	対数正規分布
粘土含量 (%)	12.2	4.08	16.68	33.5	72	正規分布
シルト含量 (%)	18.3	5.50	30.28	30.0	72	正規分布
砂含量 (%)	69.5	7.81	61.05	11.2	72	対数正規分布

*; χ^2 検定により有意水準5%で有意差あり

表-2 傾斜普通畑における土壌理化学性と地形特徴量の相関係数

	標高	勾配	勾配の変化率 最大傾斜方向	勾配の変化率 最大傾斜と 直交する方向	LAPLACIAN
A 層厚	-0.231	-0.262*	0.324**	0.277*	0.344**
全炭素含量	0.053	-0.057	-0.113	-0.040	-0.085
砂含量	0.130	0.207	0.014	-0.128	-0.074
シルト含量	-0.146	-0.151	0.121	0.121	0.140
粘土含量	0.034	-0.060	-0.191	-0.001	-0.101
乾燥密度	-0.145	0.000	-0.097	0.135	0.035
体積含水率	0.042	-0.023	0.273*	0.301**	0.335**

* ; 有意水準 0.05 で無相関が棄却される

** ; 有意水準 0.01 で無相関が棄却される

表-3 傾斜草地における土壌理化学性と地形特徴量の相関係数

	勾配	勾配の変化率 最大傾斜方向	勾配の変化率 最大傾斜と 直交する方向	LAPLACIAN	比流域	標高
A 層厚	-0.135	0.37**	0.51**	0.48**	0.38**	-0.36**
pH (H ₂ O)	0.29**	-0.33**	-0.38**	-0.39**	-0.32**	-0.03
全炭素含量	-0.40**	0.35**	0.35**	0.38**	0.51**	-0.10
リン酸吸収係数	-0.24**	0.28**	0.17	0.24**	0.29**	-0.37**
乾燥密度	0.01	0.12	0.29**	0.23*	0.13	-0.01
可給水分量	0.151	-0.10	-0.08	-0.09	-0.03	-0.04
レキ含量	0.32**	-0.35**	-0.54**	-0.49**	-0.47**	0.22*

* ; 5% 有意水準で無相関が棄却される

** ; 1% 有意水準で無相関が棄却される

大するのである。同一圃場内の東側の区画において、放射性降下物による侵食速度を推定したところ、最大値で 29 mm year⁻¹ で Ap 層の 11% もの土壌が失われていることが見積もられた (柏木, 1995)。したがって Ap 層の土壌理化学性の大きな変動は、侵食・堆積による土壌物質の移動に加えて、耕耘などの人為的なかく乱により形成されたと考えられる。

この様に変動性の大きな土壌の層厚や理化学性について、地形の形態を定量化した地形特徴量やモデル斜面による類型化が、それぞれの分布と対応しているのか、土壌分布の推定における地形情報の有効性について検討した。地形特徴量との単相関分析では、ほとんどの土壌特性との間に有意な相関関係が見いだされた。特に地表面の起伏の指数である勾配の変化率は、可給水分量以外の全ての理化学性との間に相関関係が認められ、土壌特性の分布を類推する上で最も重要性の高い地形特徴量である。勾配については相対的に重要性が低下していたが、比流域は全炭素含量において最も相関係数が大きく、水

や物質の集積を評価する地形パラメータとして有効であると判断した。地形との関係について土壌理化学性ごとに評価すると、土壌を構成する素材の特性値 (pH, 全炭素含量や粒径画分など) は相関性が高いが、土壌構造に関連する物理性は地形形態と関係づけることが困難であった。変動性が大きい、耕耘などの人為的な働きかけが地形との関連性が見えにくくなる方向に作用しているのであろう。さらに地形特徴量を説明変数として重回帰分析を行った。決定係数が 0.35~0.42 と、Moore などが提案した既存のモデルの精度と同程度であった。しかし採用された地形特徴量やその寄与の程度には一貫性がなく、汎用化や精度の向上には改良の余地を残している。次にモデル斜面ごとにそれぞれの土壌特性について、分散分析とモデル斜面間における有意差の検定を行った。地形特徴量との相関性が希薄な可給水分量以外で、モデル斜面の類型化が効果的である結果を得た。斜面の上位に分布する Int から底部付近に分布する Ats にかけて増大する土壌特性値としては、A 層厚, 全炭素

表-4 体積含水率と地形特徴量の相関分析結果

	比高	勾配	Lap 2.5 m	Lap 10 m	比流域	0829 含水率	0905 含水率	含水率変動幅
比高	1.000							
勾配	0.608**	1.000						
Lap 2.5 m	-0.209	0.023	1.000					
Lap 10 m	-0.678**	-0.421*	0.615**	1.000				
比流域	-0.581**	-0.559**	0.006	0.347*	1.000			
0829 含水率	-0.745**	-0.496**	0.148	0.635**	0.529**	1.000		
0905 含水率	-0.747**	-0.605**	0.103	0.628**	0.500**	0.851**	1.000	
含水率変動幅	-0.758**	0.424**	-0.135	-0.609**	-0.400**	-0.693**	-0.684**	1.000

Lap 2.5 m ; 2.5 m 間隔の DEM を用いて算出した Laplacian
 Lap 10 m ; 10 m 間隔の DEM を用いて算出した Laplacian

含量, リン酸吸収係数, 乾燥密度であり, 逆に減少する傾向は, pH, レキ含量で確認された。変動係数が最も小さな pH においても, その分布はモデル斜面による類型化が有効であった。ここで用いたモデル斜面の分類は, DEM から計算した地形形態の個々の定量値に閾値を定めて区分したのではなく, 定義が曖昧になるが地形形態を統合した定性的な分類である。なお計算した地形特徴量によって評価したところ, それぞれのモデル斜面は形態的な特徴を反映して分類されていることが確認された。

傾斜草地 静内

次に利用形態が放牧草地である黒ボク土の傾斜圃場を対象として, 土壌特性のパラツキに関する調査を行った。この草地は 1966 年から地形改修を行わず蹄耕法により開墾され, 以降牛の輪換放牧として利用されている。調査は斜面の頂部から低平部にかけて 185 m のトランセクトを設定し, 2.5 m 間隔で, A 層厚の測定と土壌試料の採取を行った。さらに調査地点周辺で測量を行い格子間隔が 2.5 m の DEM を作成し, 地形特徴量の算出と, 地形特徴量を組み合わせてモデル斜面の分類を行った。

勾配から地形条件を規定すると, その変動範囲は 0.02 ~ 0.45 と先の普通畑よりも大きく, 急斜面や緩斜面を含んでいた。さらに頂部から斜面下方に向かって勾配が一樣に減少する区間と, 周期的に凹凸が繰り返す低部の区間により構成されるといった特徴が見られた。各土壌特性の変動係数を前述の普通畑と比較すると, A 層厚や全炭素含量については小さいものの, 細粒画分(シルト, 粘土)では上回っていた。特に層厚に関しては, 起伏の激しい区間において値の変動が大きく, 区間の分散値が急激に増大することが地形変化の影響として認められた。しかしながらそれぞれの分布は, モデル斜面や地形

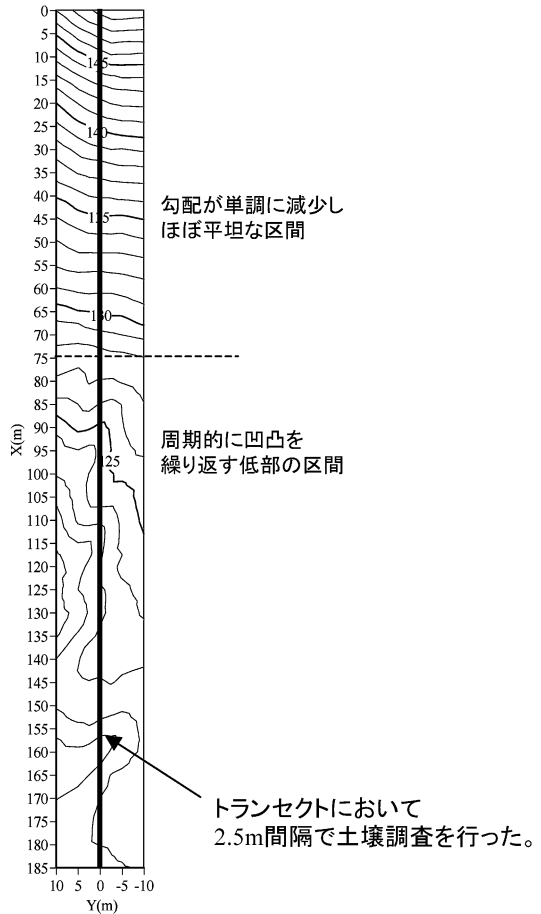


図-4 傾斜草地に設定した調査区の概要

特徴量を用いることで明確な分布特性を見出すことはできず, ランダム分布の特徴を示した。平均で 10 cm の厚さの A 層直下には, すべての調査地点で噴出源の特定

できる軽石層（有珠山 Us-c）が存在していたことから、深刻な土壌侵食は発生していないと判断した。つまり地形条件に応じた土壌物質移動が抑制されていたために、土壌特性の分布は地形形態に説明できなかったのである。ただし含水率が大きく飽和透水係数が小さな比較的厚い A 層は、集水型の発達した地形条件に偏った分布をとる傾向が確認された。耕地化により土壌侵食を抑制するような管理が行われている圃場においても、土壌水分あるいは溶質の分布の形成にとって地形が関わっていることを示唆する結果である。

土壌水分 静内

土壌水分の空間分布は降雨などの気象条件に左右され、土壌の生成速度に比べて圧倒的に時間変化のスケールが小さい。つまり、観測された土壌水分の空間分布は一時的なものであり、連続的に観測を行うかあるいは少なくとも測定時の気象条件を明らかにしておくべきである。そこで同じ牧場内の採草地において、土壌水分の分布と地形の関係を評価するために、FDR 土壌水分計を用いた定点観測を実施した。90×90 m の調査区において、46 の観測地点を設け、ルートマット直下（深さ 8 cm）の体積含水率を測定した。測定は 6 月から 9 月にかけて、7 回実施した。これまでと同様な地形特徴量の算出のために、測量を行い 2.5 m DEM を作成した。

測定値を降雨後の経過時間で整理すると含水率の減少傾向が見られたが、地点間によりその程度は大きく異なっていた。6 月 20 日の 17 mm の降雨 1 日後に体積含水率が $0.015 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以上増加したのは 5 地点/43 地点、8 月 28 日前後に観測された 6 mm の降雨後 1 日で 0.02 m^3

m^{-3} 以上の増加は 6 地点/46 地点で観測された。さらに測定実施日の変動係数は、降雨中では 6% 程度であるのに対して、降雨後の経過日数にともなって増大し 6 日後では 12% となっていた。このことは、土壌中の再配分過程において、排水による乾燥化が進行しやすい地点や逆に周囲から集水しやすい地点が併存することを意味している。表層の排水性を規定する地形条件を明らかにするために、各地点の含水率およびその変動幅（期間内に測

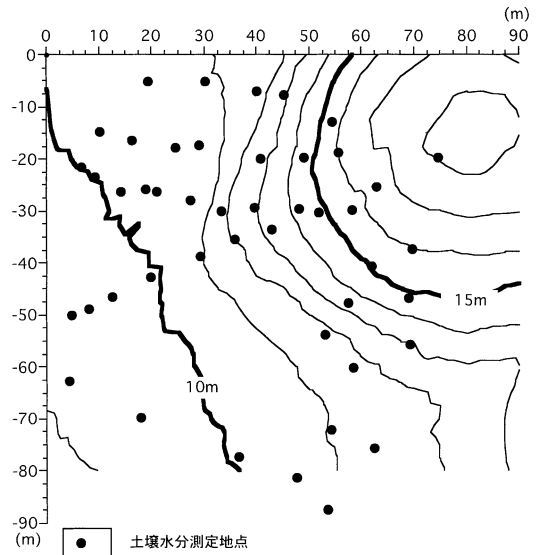


図-5 傾斜草地（土壌水分測定）の概要

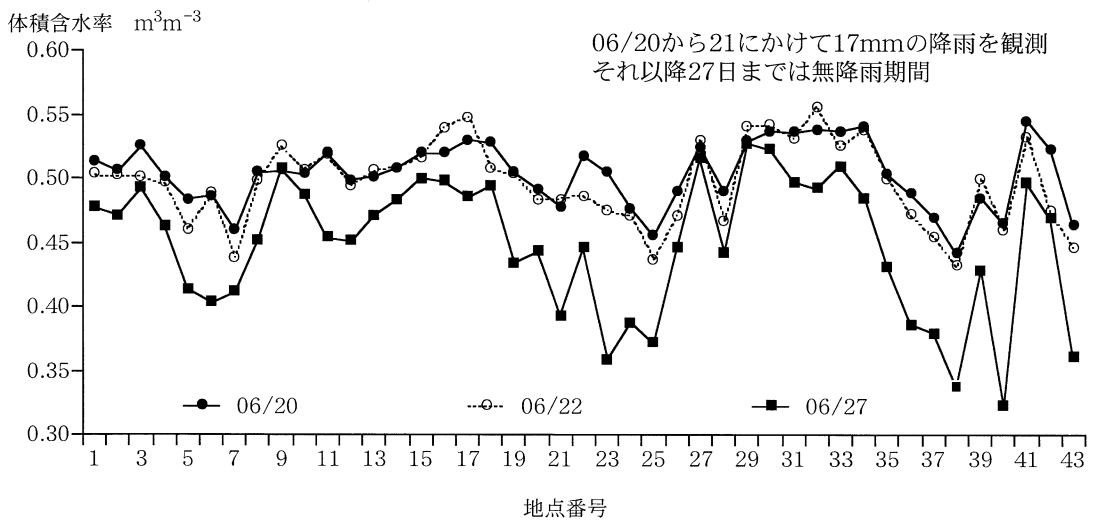


図-6 各測定地点における体積含水率の時期別変化

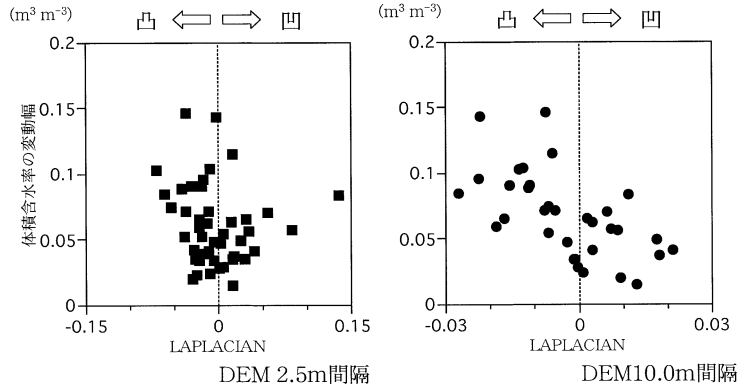


図-7 体積含水率の変動幅とLAPLACIAN の関係について

定された最大値と最小値の差)と地形特徴量の相関分析を行った。地形特徴量と体積含水率の間には有意な相関関係が認められた。変動幅については、高度、ラプラシアン(凹凸の指標)、勾配、比流域の順で相関係数の絶対値が大きくなっていった。したがって、排水不良地が分布しやすい地形条件は、広い集水面積を持つ緩傾斜で凹型な低地となる。なおここで対象とした地形は、これまで説明してきた凹凸が繰り返されるような複合斜面ではないために、高度が最も相関性の高い地形特徴量として選抜されたのである。地形の複雑さが増大した場合ほど、凹凸の地形条件が相対的に重要になるように思われる。また凹凸の指数であるラプラシアンに関しては、算出に用いたDEMの大きさ(単位長さ)によって相関分析結果が左右される結果となった。詳しくは説明していないが、普通畑の場合でも、DEMの間隔に応じて得られる相関係数が大きく変化することが確認されている。地形特徴量の算出にあたっては、DEMの間隔によって再現される地形形態が大きく異なってくるため、十分な検討が必要となる。

おわりに

地形変化を内包する圃場においては、土壌特性のパラッキが大きく、それが作物の生育にも反映されるため、土壌の局所的な管理や改良が必要となる。ここでは面的に把握する手段として、DEMから算出した地形特徴量を用いた帰モデルや地形形態を取り入れたモデル斜面への類型化の有効性について検討した。これまでに生じた移動現象の結果として形成された土壌特性の分布を、現在の地形形態から推定することを考えれば、十分に満足の行く結果である。さらに精度の高いものするためには、DEM自体の精度を向上させる、有効なDEMの間隔を検討する、個々の地形形態の組み合わせ(モデル斜

面分類のアルゴリズムや重回帰モデルの検討)や形態の定量化の検討、などがあげられる。また先だって、土地利用の履歴に関する情報を収集すること、斜面上の位置ごとに土壌断面調査を行い、観察された断面の形態から、これまでに生じている移動現象を予察することは不可欠な作業である。

参考文献

- Dalrymple, J.B., Blong, R.J. and Conacher, A.J. (1968): An Hypothetical Nine Unit Landsurface Model. *Zeitschrift fur Geomorphologie N.F. Bd.*, **12**: 60-76.
- Evans, I.S. (1980): An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping. *Zeitschrift fur Geomorphologie N.F. Bd.*, **36**: 274-295.
- Hansen, B., Per Schjonning and Sibbesen, E.(1999): Roughness Indices for Estimation of Depression Storage Capacity of Tilled Soil Surfaces. *Soil & Tillage Research*, **52**: 103-111.
- Hasegawa, S. (1997): Evaluation of Rainfall Infiltration Characteristics in a Volcanic Ash Soil by Time Domain Reflectometry Method. *Hydrology & Earth System Sci.*, **1**: 303-312.
- King, D., Bourennane, H., Isambert, M. and Macaire, J. J. (1999): Relationship of the Presence of a Non-Calcareous Clay-Loam Horizon to DEM Attributes in a Gently Sloping Area. *Geoderma*, **89**: 95-111.
- Miller, M.P., Singer, M.J. and Nielsen, D.R. (1988): Spatial Variability of Wheat Yield and Soil Properties on Complex Hills. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**: 1133-1141.

- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A. and Peterson, G.A. (1993) : Soil Attribution Prediction Using Terrain Analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57** : 443-452.
- Park, S.J., McSweeney, K. and Lowery, B. (2001) : Identification of the Spatial Distribution of Soils Using a Process-based Terrain Characterization. *Geoderma*, **103** : 249-272.
- Pennock, D.J. and Corre, M.D. (2001) : Development and Application of Landform Segmentation Procedures. *Soil and Tillage Res.*, **58** : 151-162.
- Speight, J.G. (1980) : The Role of Topography in Controlling Throughflow Generation : A Discussion. *Earth Surface Processes*, **5** : 187-191.
- Timlin, D.J., Pachepsky, Ya., Snyder, V.A. and Bryant, R.B. (1998) : Spatial and Temporal Variability of Corn Grain Yield on a Hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62** : 764-773.
- Van Oost, K., Govers, G., Van Muysen, W. and Quine, T.A. (2000) : Modeling Translocation and Dispersion of Soil Constituents by Tillage on Sloping Land. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64** : 1733-1739.
- Woods, L.E. and Schuman, G.E. (1988) : Cultivation and Slope Position Effects on Soil Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52** : 1371-1376.
- Zevenbergen, L.W. and Thorne, C.R. (1987) : Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, **12** : 47-56.
- 柏木淳一・佐久間敏雄 (1995) : 放射性降下物 (^{137}Cs) による積算土壌侵食量の推定. *土壌の物理性*, **71** : 57-62.
- 田村俊和・吉永秀一郎 (1996) : 微地形分類と地形発達, *水文地形学*. pp. 177-189, 古今書院.
- 三浦健志 (1983) : 地形情報と土壌の物理性. *土壌の物理性*, **47** : 8-14.

受稿年月日 : 2004年11月24日

受理年月日 : 2005年1月20日

柏木淳一氏講演に関する質疑

石黒宗秀 (岡山大学環境理工学部) :

日本のような火山国において傾斜地の土壌の空間変動を考える場合、他地域の火山からの火山灰の影響も重要と思うが、調査地においてはどうか。

柏木 :

当然、火山灰の積もり方も地形に強く作用されて層厚なども決まると考えられる。今回は単一の圃場という狭い範囲を考えているが、圃場内の凹凸などが火山灰の層厚に与える影響は無視出来ないと考え、同じ牧場内の有珠山や樽前山の火山灰が堆積して出来ている圃場で別途調査を行った。しかし、地形情報と火山灰の層厚との間には、関係性が見出せなかった。もっと大きなスケールで検討した場合には、関連性が見出せる可能性はあると思う。

石黒 :

今回の調査地は全て火山灰土地帯か。

柏木 :

火山灰土地帯とそうでないところとの両方がある。火山灰土地帯での調査結果からは、同一の土地利用形態であれば、地形と火山灰の層厚の間に関係性は見出せなかった。

石黒 :

標高の高い地点と低い地点では、同一層内でも母材は異なるのではないか。

柏木 :

地表から20~30 cm位までの表層土壌を対象にこの調査を行ったが、地形との間に顕著な差は見られなかった。むしろ、下層土においては、谷部に水が集まりグライ斑が浅いところから出てくるなど、下層土に関しては地形との関係性が見られた。この違いは母材の差によるものではない。

赤江剛夫 (岡山大学環境理工学部) :

調査圃場は開畑後、どの位の年数が経過しているのか。

柏木 :

農家の人に聞いた話では、80年位経過しているとのことだった。隣接地は推定樹齢30年位の林地であり、開畑と林地化を繰り返している様でもある。

赤江 :

調査地では単一の作物を作付しているのか。

柏木 :

もともと凸部を3つ、凹部を4つ含む波状地形で、調査は地形改修を行う直前に行った。この時点では、等高線に沿ってではなく、小流域単位で3つに分割して管理していた。