J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 96, p. 71～81 (2004)

傾斜畑における土壌特性の空間変動の解析

柏　木　淳　一*

Spatial Variability Analysis of Soil Properties in a Hilly Upland Field

Junichi KASHIWAGI*

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

Abstract

Spatial variability of soil properties was studied by using correlation analysis with landscape and geostatistical concepts on a 1.2-ha upland field in a hilly area. Soil properties of Ap horizon were examined on a square grid at 14-m intervals and on three transects at 7-m intervals. The CV values suggested that the variabilities of most soil properties were higher than the results reported at any topographical conditions. These large variables depend on the result of soil erosion and sedimentation in response to the landscape. At the eroded area, the thickness of Ap horizon had been kept constant with subsoil by tillage, as a result Ap horizon was composed of different soil materials from sedimentation and erosion effects. The spatial variability of pH, total carbon content, phosphate absorption coefficient, bulk density, stone, sand, silt and clay content could be explained with topographical features ; however, available water content was difficult to explain. Moreover, former properties were distinguished at landscape model units, these contribute to the rational soil sampling system to realize regional soil management. The multiple regression models of total carbon and stone content, using only topographic attributes calculated from a digital elevation model (DEM), matched reasonably well with the observed data.

Key words : soil properties of Ap horizon, spatial variability, terrain analysis, geostatistics, spatial distribution

1.　はじめに

傾斜地における作物の成育状況や収量は空間的な変動性が大きい。Miller *et al.*（1988）は，小麦の収量は斜面形態で分類した区画ごとに差があり，作土層の粘土含量の多寡によるものであると説明している。また Timlin *et al.*（1998）は，傾斜畑におけるコーンの生育は気象条件に応じて年次変動が大きく，その空間分布は作土層の保水・排水性や層厚により決定されることを報告している。このように生産性のバラツキは，地点間の土壌特性の差異に起因するものであり，画一的な栽培，土壌管理では生産性のバラツキを回避することは不可能である。農地としての機能を有効に活用するためには，局所的な土壌改良や精密農法等の管理技術の導入が必要となる。そのためには，土壌の空間分布を把握しなければならず，省力的かつ精度の高い手法を確立することが重要な課題となっている。

広い領域を対象として面的な土壌情報を収集する方法として，リモートセンシング技術の利用があるが，分解能の点や対象とする土壌特性の面で制限を受ける。また短時間に多量の土壌特性データを得るために，リアルタイム土壌センシングに関する研究開発も進められており，Imade *et al.*（2001）は水田土壌において土壌水分と有機物含量の測定に分光反射センサが有効であることを示している。これらの技術が広範囲の土壌特性にわたって応用が可能となれば，土壌の空間分布を知る上で有力

* 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：作土の特性，空間変動，地形解析，地質統計学，空間分布

なツールを得ることになる。

また少ないデータ数の実測値から未計測地点の値を精度良く予測することも，土壌特性分布を把握する有効な手段である。土壌特性に対して適応性が高く精度の良い方法としてKrigingがある。これは測定した土壌特性値を局所的変数（Regionalized Variable）として空間変動構造を明らかにし，その関係から補完する地質統計学的手法（Geostatistics）である。Burgess and Webster（1980 a, b），Webster and Burgess（1980）の一連の研究に見られるように，Krigingを適用することで，詳細な土壌特性の空間分布情報を比較的容易に得ることが可能となっている。しかし，この手法はあくまで統計学的なものであり，土壌の生成や移動といった土壌の空間変動に関与する現象に基づいたモデルではない。そのため原則として各圃場，各土壌特性ごとに空間構造を明らかにしなければならない。

ここで対象としているのは傾斜畑における土壌特性分布であり，その分布の形成には地形による物質移動作用が深く関与しているものと考えられる。直接的な地形作用として，重力によるプリープ**やソリフラクション***，耕耘に伴った土壌粒子の斜面下方への移動（Van Oost *et al.,* 2000）がある。間接的なものとしては，地形が侵食・堆積や溶脱・集積現象を引き起こす水や風の移動に影響を及ぼすことや，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に影響を及ぼすことが上げられる。これらの作用の結果として形成された様々な土壌の性質の分布については，斜面上の位置や地形の形態を考慮することで，それらの特徴を明らかにできるケースが数多く報告されている（Woods and Schuman, 1988, King *et al.,* 1999, Pennock and Corre, 2001, 三浦，1983）。さらにMoore *et al.*（1991）は，DEM（Digital Elevation Model）を用いて地形形態を定量的に評価する方法について検討しており，表層厚やpHについて勾配や凹凸等の地形特徴量を用いた推定モデルを提案した（Moore *et al.,* 1993）。またPark *et al.*（2001）は，傾斜地における土壌物質移動を考慮し，凹凸と流域面積からなる地形特性値（Terrain Characterization Index : TCI）を提案し，土壌層厚分布における有効性について論じている。この様に地形的な特徴を定量化することで，傾斜地における土壌の空間分布を評価し予測モデルについて検討することが可能になる。しかしながら気象や圃場管理等の条件により，前述した土壌化や物質移動に関与する地形作用の組み合わせや重要性は異なると考えられる。したがって，対象とする圃場の環境条件を明確にした上で，土壌特性の空間分布の実態を地形変化と関連づけて明らかにすることが重要である。蒸発散よりも降水量が卓越する湿潤な気象条件で，地形変化に富む山間部に広く展開する我が国の畑地において，土壌特性の空間分布に関する報告は少ない。さらに，地形を定量化してその空間分布を評価する試みはこれまでに行われていないのが現状である。

そこで，長期間にわたり耕作されてきた地形変化に富む傾斜畑を対象として，作土層における理化学性の空間変動性の実態を明らかにするために調査を行った。解析にあたっては，特に地形形態や斜面上での位置に関連する要素を用いることで，空間変動の実態を明確にするとともに，その変動の形成に関わる地形作用について考察した。そして土壌の空間変動を考慮した局所的な土壌管理や土壌改良を想定し，面的な土壌特性分布を把握するための土壌調査法やデータの解析方法について，地形情報の有効性に関して検証した。

2. 調査およびデータの解析

2.1 土壌試料の採取と理化学性の分析

調査圃場は柏木（2003）が対象とした1.2 haの傾斜畑と同じである（図1）。土壌試料採取地点は，14 m間隔の正方格子の交点と3本の代表トランセクト上の7 m間隔の地点，計155地点においてAp層の土壌試料を採取した。

分析項目は，物理性として乾燥密度，可給水分量，全炭素含量，粒径組成，化学性としてpH, リン酸吸収係数である。

乾燥密度ならびに可給水分量の測定には50 cm^3円筒コアの不攪乱土壌試料を用い，砂柱法による4.9 kPaの体積含水率（圃場容水量）と加圧膜法による1,470 kPaの体積含水率（永久しおれ点）の差を可給水分量（%）とした。全炭素含量はCNコーダによる乾式燃焼法により分析した．粒径分析は国際法に準じて区分し，レキ含量はし別法で，砂，シルト，粘土含量はピペット法により測定した。なお，2 mm以下の粒径分析はトランセクト上の72地点の試料についてのみ行った。

pHは土壌を水と1N-KCl溶液（1 : 2.5）により抽出した後，ガラス電極pHメータを用いて測定した。また，リン酸吸収係数はリン酸アンモニウム液法により測定した。

2.2 地形解析

地形解析については，Zevenbergen and Thorne（1987）によって確立されたDEMを用いた地形特徴量

** 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。

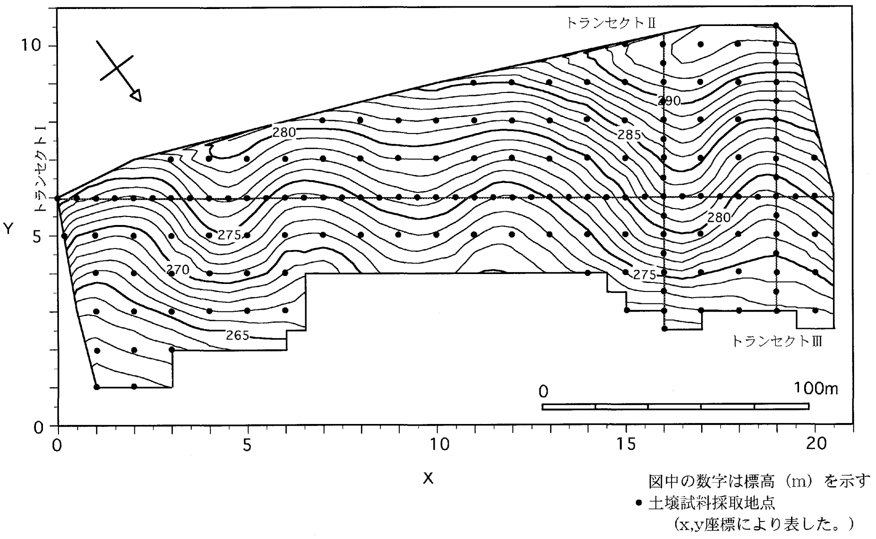

図-1　調査圃場の概要と土壌断面調査地点

Fig. 1　Surface elevation map and the soil profile investigation sites.

の算出と，土壌移動現象と斜面形態の関係から Dalrymple *et al.* (1968) が提案したモデル斜面への分類を行った。

地形特徴量は，最大勾配（勾配），最大勾配を示す方向の勾配の変化率（PROFC），直交する方向の勾配の変化率（PLANC），ラプラシアン（LAPLACIAN），比流域（Specific Catchment Areas）の地形特徴量を 7 m-DEM から求めた（柏木，2003）。

またモデル斜面については柏木（2003）に倣い，稜線部（INTERFLUVE ； Inf)，凸型クリープ斜面（CONVEX CREEP SLOPE ; Ccs)，等斉輸送斜面（TRANSPORTATIONAL MIDSLOPE ; Tms)，崩積性緩斜面（COLLUVIAL FOOTSLOPE ; Cfs)，沖積性緩斜面（ALLUVIAL TOESLOPE ; Ats）に分類した。

2. 3　土壌特性の空間変動性の解析

土壌特性の分析値や地形特徴量の算出値について，それぞれ以下のデータ処理を行った。

・統計分析

平均，標準偏差，分散，変動係数を計算した。また確率密度分布特性として正規分布への適合度を χ^2 検定により行った。

・相関分析

それぞれの土壌特性値と地形特徴量の間において相関係数を計算し，無相関について t 検定を行った。

・分散分析

それぞれの土壌特性値に対して，モデル斜面を水準とした一元配置の分散分析を行った。なおそれぞれの水準間の平均値の差については，最小有意差法を用いて検定した。

・重回帰分析

土壌特性値について，地形特徴量を説明変数に用いて，変数の取り込みおよび除去の F 値を 2.0 とした変数増減法により重回帰分析を行った（河口，1973)。

・Geostatistics

トランセクトⅠにおける測定値についてセミバリオグラム（$\hat{\gamma}(h)$）を計算し，それぞれの土壌特性の空間変動構造を評価した。

3.　調査結果及び考察

3. 1　土壌理化学性の統計分析

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。一般に土壌特性の変動は対象領域（サンプリング間隔）の増大に伴って大きくなり，その程度は土壌特性ごと，あるいは土壌層位ごとに異なることを Bekkett and Webster（1971）や Webster（1985）は示している。土壌特性の変動について検討した既存の報告によれば，乾燥密度については，0.05 ha の傾斜畑を対象

表-1　土壌特性値の統計分析結果

Table 1　Statistical analysis for soil properties

土壌特性	pH(H_2O)	pH(KCl)	全炭素含量（%）	リン酸吸収係数（P_2O_5mg/100g乾土）	レキ含量（%）	乾燥密度（$Mg\,m^{-3}$）	可給水分量（%）	粘土含量（%）	シルト含量（%）	砂含量（%）
平均	6.14	5.20	2.50	580.9	7.1	1.04	32.8	12.2	18.3	69.5
標準偏差	0.36	0.37	0.98	171.2	3.8	0.10	10.4	4.1	5.5	7.8
分散	0.13	0.13	0.95	29293.9	14.3	0.01	108.4	16.7	30.3	61.0
変動係数	5.9	7.0	39.0	29.5	53.1	9.8	31.8	33.5	30.0	11.2
標本数	155	155	155	155	155	155	155	72	72	72
確率分布*	—	正規分布	正規分布	正規分布	対数正規分布	正規分布	対数正規分布	正規分布	正規分布	対数正規分布

*；χ^2検定により有意水準5%で有意差あり

とした前田ら（1971）の報告では変動係数は5%，地形変化に乏しい0.44 haの転換畑においての安中（1986）の結果では，乾燥密度の変動係数は4.4%，また正常生育有効水分量（pF 1.5含水量－pF 3.0含水量）に関しては29%と報告している。一方，広域の土壌物理性の変動を調査した徳永と佐藤（1975）によれば，乾燥密度では7.1%（9ha, 数千haでは13%程度），有効水分（pF 1.8含水量－pF 3.0含水量）では11.8%（9ha，数千haでは20%以下）の変動係数を示している。したがって対象領域を考慮しても，本調査圃場で得られた土壌構造の特性値である乾燥密度や可給水分量の変動性は大きいと判断された。また，土壌の素材に関する特性値に関しては，圃場内の全炭素含量で25～30%，複数の隣接する圃場を対象とした砂およびシルトでは10%の変動係数を示したBekkett and Webster（1971）の結果と比べて，筆者の研究から得られたそれぞれの変動係数はこの参考値よりも大きく，これらの土壌の物理性に関しても大きな変動が生じていた。

確率分布は，表1に示すようにpH（H_2O）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。

土壌断面調査結果ではAp層の直下にC層となるAp/Cの層序やAp/Ab（B)/Cの層序が地形条件と対応して分布していることが確認された（柏木，2003)。前者の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・砕土・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大するのである。したがって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ることができる。

3.2　土壌理化学性の空間変動

3.2.1　代表横断面（トランセクトⅠ）の空間変動

トランセクトⅠは主傾斜と直交する方向に定めたトランセクトで，この横断面においては地表面は周期的に変化しInf～Atsの一連のモデル斜面が連続している。このトランセクト上の理化学性の変動は，図2に示すように地形変化に対応した周期的な変動が認められる。つまり，この断面で凸型となっている付近（Inf・Ccs）ほど相対的にpH, 砂含量，レキ含量，可給水分量が大きく，反対に凹型となっている付近（Cfs・Ats）では，全炭素含量，リン酸吸収係数，シルト・粘土含量，乾燥密度が大きいといった傾向である。この様な周期的な変動は，可給水分量ではやや不明瞭となり，全炭素含量ではX軸の増大する方向（北西）に向かって値が増加するといった様に，それぞれの性質においてその特徴には違いが認められた。ここで，それぞれの空間変動性を評価するために$\hat{\gamma}(h)$を算出し，図3に示した。$\hat{\gamma}(h)$は，変動にトレンドを含んでいる場合や周期的な変動についてはそれらの変動構造を反映した形状となることが知られている（Jounel and Huijbregts, 1978)。可給水分量以外の土壌特性においては，波長が56～70 m（lag＝8～10）の周期変動を示す$\hat{\gamma}(h)$となり，標高の$\hat{\gamma}(h)$と定性的に類似していることから，これらの空間変動は地形と密接に関連しているものと判断した。なお，全炭素含量およ

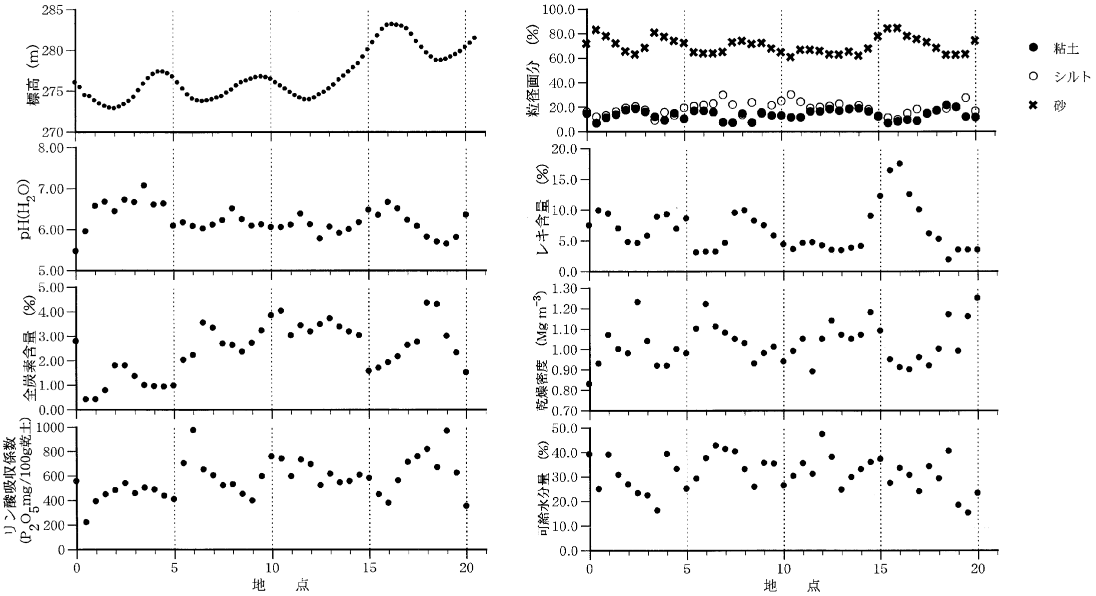

図-2　代表横断面上（トランセクトＩ）の土壌特性の変動

Fig. 2　Soil properties along the transect I.

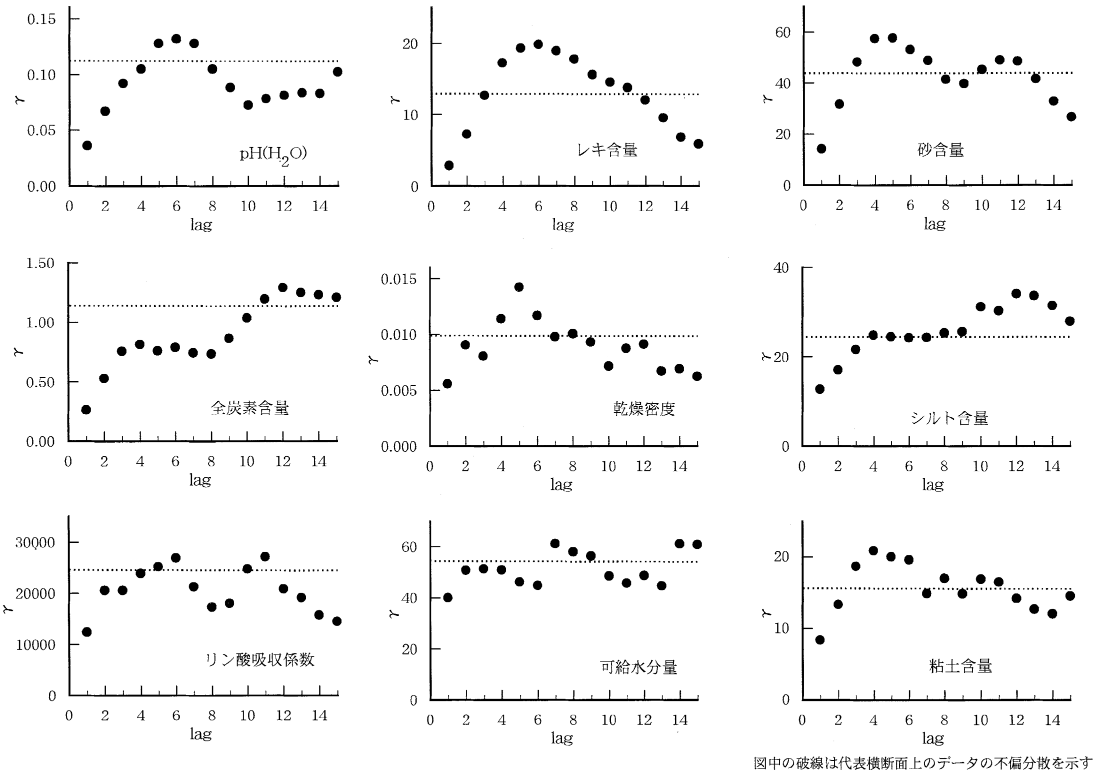

図-3　代表横断面（トランセクトＩ）における土壌特性のセミバリオグラム

Fig. 3　Experimental semi-variograms for soil properties along the transect I.

びレキ含量と砂の$\hat{\gamma}(h)$ はnugget effectが小さいことから，特に変動が滑らかな空間変動構造であることが判明した。一方，可給水分量については，nugget effectが大きく，また他の土壌特性で認められた周期変動性が微弱であることから，ほぼ空間的にランダムな変動で，その空間分布には地形情報を関係づけることが困難な土壌特性であると位置づけた。

3.2.2 空間分布特性と地形特徴量

次に土壌特性の空間変動にはどのような地形条件が関連しているのかを明らかにするため，地表面変化の一次微分で表現される勾配や二次微分である勾配の変化率（PLOFC, PLANC）等の地形特徴量とそれぞれの土壌特性の実測値について相関分析を行った。表2に示した結果から，乾燥密度と可給水分量以外の土壌特性については，ほとんどの地形特徴量と有意な相関関係が認められた。特に勾配の変化率（PLOFC, PLANC）および比流域は多くの土壌特性と有意な相関がみられ，またAp層厚に関しては相関が認められなかった勾配（柏木，2003）

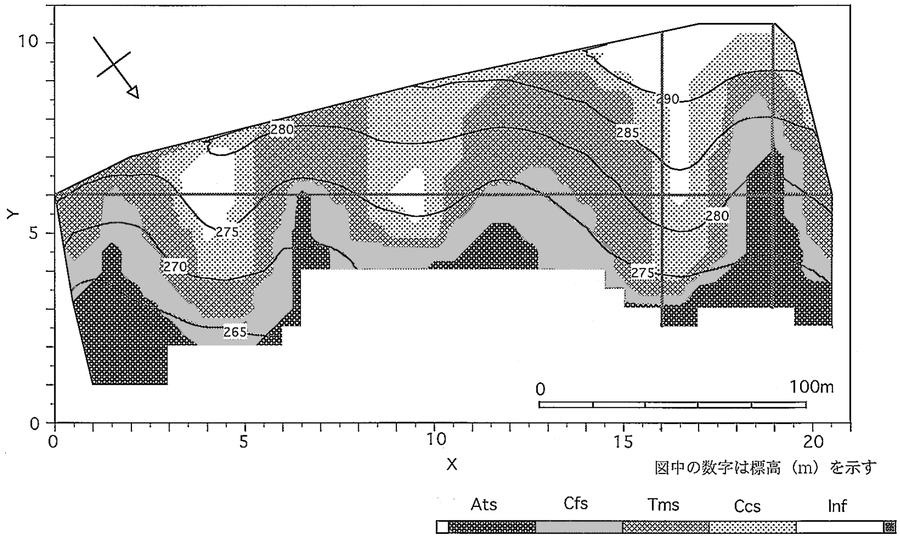

図-4 モデル斜面の空間分布

Fig. 4 Spatial distribution of landsurface model units at the investigation area.

表-2 地形特徴量と土壌特性の相関係数

Table 2 Correlation coefficient for topographic attributes and soil properties

	勾配	PROFC	PLANC	LAPLACIAN	比流域	標高
pH（H_2O）	0.286**	0.334**	0.378**	−0.388**	−0.323**	−0.030
pH（KCl）	0.215*	0.275**	0.391**	−0.366**	−0.187*	−0.196*
全炭素含量	−0.398**	−0.346**	−0.354**	0.380**	0.513**	−0.099
リン酸吸収係数	−0.236**	−0.277**	−0.169	0.237**	0.288**	−0.369**
乾燥密度	0.006	−0.119	−0.289**	0.229*	0.128	−0.008
可給水分量	0.151	0.095	0.079	−0.093	−0.028	−0.037
粘土含量	−0.118	−0.311*	−0.509**	0.459**	0.409**	−0.326**
シルト含量	−0.426**	−0.317*	−0.482**	0.445**	0.368**	−0.298*
砂含量	0.368**	0.393**	0.617**	−0.565**	−0.472**	0.380**
レキ含量	0.319**	0.348**	0.544**	−0.493**	−0.465**	0.221*

*；5% 有意水準で無相関が棄却されない

**；1% 有意水準で無相関が棄却されない

もpH，全炭素含量，リン酸吸収係数，レキ含量，シルトおよび粘土含量との相関が確認された。標高は，pH（KCl），リン酸吸収係数と各粒径画分との間に相関関係が見られたが，全炭素含量とは無相関であった。前節で述べたように，代表トランセクトにおいて全炭素含量は地表面の変化（凹凸）と密接に関連しつつも，全体として偏向することが明らかになった。つまり全炭素含量の分布は，微視的な斜面上の位置や形態のほかに，稜線で囲まれる小流域スケールごとの地形条件を反映しやすいものと考えられた。なお土壌水分と関連性の高い比流域との相関係数は0.51と最も大きく，集水性の良い部分ほど有機物の蓄積が優勢となることが分かった。全炭素含量のほかに地形特徴量の間に強い相関関係が見られた土壌特性は，各粒径含量であった。粘土，シルト，砂含量のデータ数はレキ含量等の半分ではあるものの，相関係数の絶対値は他の土壌特性を上回っており，中でもPLANCとの間ではほぼ0.50以上を示した。このことより土性分布は地形条件，特に凹凸と対応し，集水型の斜面では細粒質の土壌が，逆に散水型の斜面では砂，レキ含量が増大し中粒質土壌が卓越することになる。

3.2.3　モデル斜面による土壌理化学性の類型化

個々の地形特徴量は，形態的な特徴をそれぞれ数値化したものである。実際の地形では地形特徴量間において特定の関連性が見いだされており，Dalrymple *et al.*（1968）が提案したようにモデル斜面として分類することが可能である（図4）。なおこの分類に当たっては，Park *et al.*（2001）のように地形特徴量に閾値を設けて判別したものではないが，モデル斜面を地形特徴量から説明することもできる（柏木，2003）。例えば，Atsは相対的に緩勾配で，凹型の形態が主体となり比流域が大きく低所に分布する斜面と特徴づけることができる。

各モデル斜面間での土壌特性の相違について分散分析を行い検討した。表3の分散分析結果では，可給水分含量以外の性質では水準間に有意差が認められる。この相違は代表横断面で認められた傾向と一致しており，Inf側で大きな値をとる土壌特性としてはpH，レキ含量であり，反対に斜面の下方に分布するAtsに向かって値が増大する特性は，全炭素含量，リン酸吸収係数，乾燥密度であった（図5）。

変動性数が最大となったレキ含量については，モデル斜面間の相違が明瞭であった。土壌断面形態より侵食相としたInf, Ccs（柏木，2003）では，標本平均はほぼ10%以上の大きな値をとり，斜面の下方に向かって値が減少し，堆積相のCfsやAtsでは5%以下の値となる。そし

表-3　土壌特性に関するモデル斜面間での分散分析結果

Table 3　Analysis of variance for soil properties at each landsurface models

土壌特性	要　因	偏差平方和	自由度	平均平方	F 値
pH（H_2O）	モデル斜面間	2.73	4	0.68	$^{**}5.914>3.447=F_{(4,150)}(0.01)$
	モデル斜面内	17.34	150	0.12	
	全　体	20.08	154		
全炭素含量	モデル斜面間	55.10	4	13.78	$^{**}22.620>3.447=F_{(4,150)}(0.01)$
	モデル斜面内	91.35	150	0.61	
	全　体	146.45	154		
リン酸吸収係数	モデル斜面間	1349506.5	4	337376.6	$^{**}16.006>3.447=F_{(4,150)}(0.01)$
	モデル斜面内	3161748.4	150	21078.3	
	全　体	4511254.9	154		
レキ含量	モデル斜面間	893.9	4	223.5	$^{**}25.641>3.447=F_{(4,150)}(0.01)$
	モデル斜面内	1307.4	150	8.7	
	全　体	2201.3	154		
乾燥密度	モデル斜面間	0.15	4	0.04	$^{**}3.787>3.447=F_{(4,150)}(0.01)$
	モデル斜面内	1.45	150	0.01	
	全　体	1.60	154		
可給水分量	モデル斜面間	671.7	4	167.9	$1.573<2.432=F_{(4,150)}(0.05)$
	モデル斜面内	16017.6	150	106.8	
	全　体	16689.3	154		

** ; 1% 有意水準において有意差あり

て，斜面上部のInf, Ccsと斜面下部のCfs, Atsの間にはそれぞれ5%水準で母平均に有意差が認められた。このレキは断面調査よりC層由来のものであることが確認されており，Ap層土におけるC層土の混入程度の指標と見なせる。したがってレキ含量からも，InfやCcsのAp層は，土壌侵食による流亡した土壌を下層土により補うことで生成されたと判断することができる。一方，変動係数が10%以下で変動性の小さなグループに属していたpHについても，その分布はモデル斜面により類型化できた。斜面の下方ほど値が単調に減少しており，pH（H_2O）ではInfとTms〜Ats, AtsとTms〜Inf（pH（KCl）ではInfとAtsの間のみ）で，それぞれ5%水準で母平均に有意差が認められた。これは酸性改良の炭カル施与に対する反応性の違いのため生じたものと思われる。すなわちInfやCcsのAp層では，pH緩衝能が低下し炭カル施与によりpHの上昇を起こしやすく，AtsのAp層では前時代のA層，B層の材料を多く残存しており，pH緩衝能が高く炭カルを施与してもpHが上昇しにくいためであると推定される。全炭素含量に関しては，斜面下方へ向かっての顕著な増加傾向が認められた。AtsではInfの2倍以上の標本平均を示し，Tmsより上方とCtsより下方のそれぞれのモデル斜面間において有意差が認められた。斜面上部のInf, Ccsでは，下層土の混入による希釈が，斜面下部では水の集積や太陽放射の遮蔽により土壌温度の上昇が妨げられるため有機物の分解速度が遅いことが，モデル斜面間の差が大きい原因として考えられる。リン酸吸収係数については斜面の下方に向かって値の増大する傾向を示していた。CfsやAtsではAp層を構成する材料として細粒分が多く，母材の風化が進みリン酸固定能を示す土壌物質に富むためと考えられる。各モデル斜面間の比較を行ったところ，TmsとCcs, Cfsの間以外で母平均の有意差が認

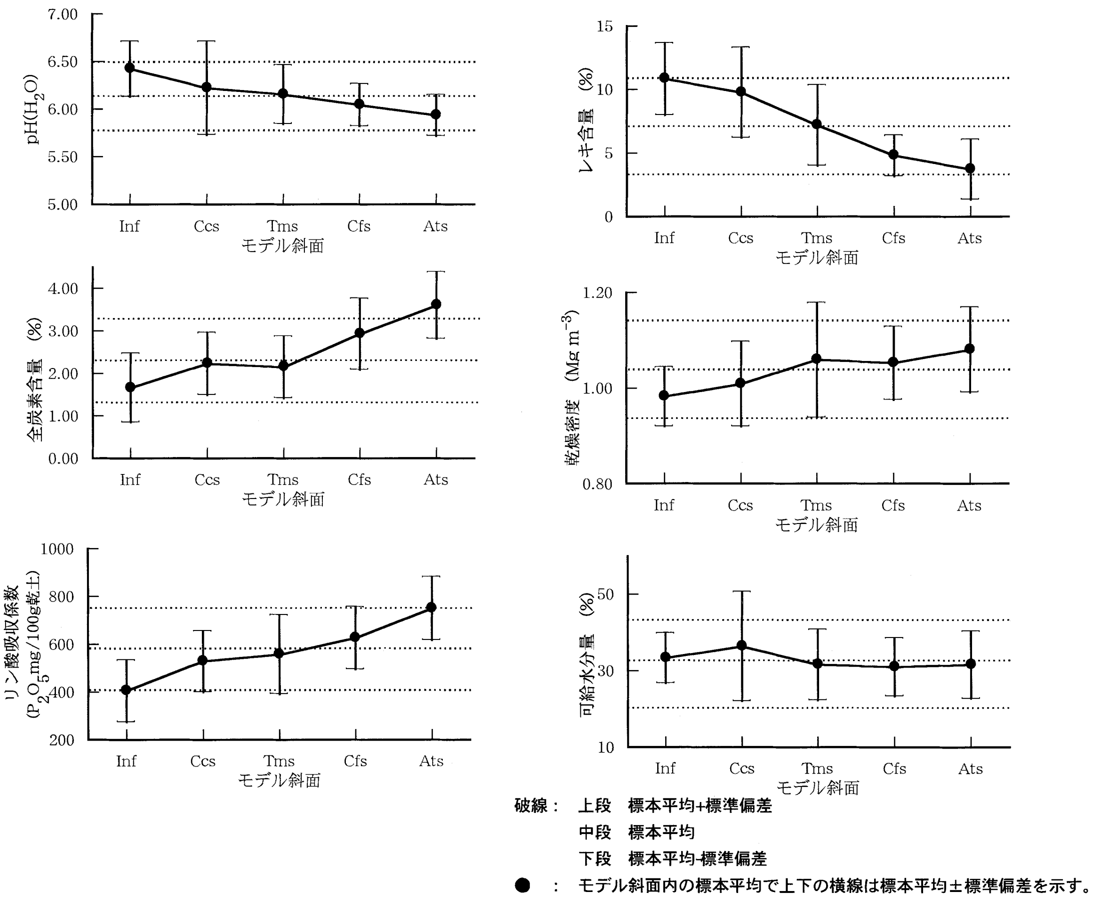

図-5 土壌特性のモデル斜面間の相違

Fig. 5 Soil properties at the each landsurface model units.

められた。乾燥密度は変動係数が9.8％と相対的に変動性が小さな土壌特性であるが，その空間分布に関してはモデル斜面間での有意な差が認められた。つまり斜面上部のInfやCcsに対してAtsの標本平均の方が大きくなっており，斜面下部では乾燥密度が増大することを示していた。

3.3　土壌特性の面的な把握について

3.3.1　圃場の代表値の抽出

傾斜畑では土壌特性のバラツキが大きく，その空間分布に関しては地形が深く関与している。したがって土壌特性の代表値を得るためのサンプリングの場合は，地形条件を考慮することで省力化が見込まれる。そこで長堀ら（1971）が，土壌，利用形態ごとに示した必要サンプル数についての考え方を用いて検証する。これは土壌特性の確率分布を正規分布とみなし精度ε（％），危険率α（％）で母平均の推定のために必要な抽出数を求めるものである。そして空間的な配列に関するものとして徳永と深山（1971）は，水田の含水比と乾燥密度についての解析結果から，対象とした圃場内の切土部と盛土部で有意差が認められ，無階層ランダム抽出よりも層別抽出を行う方が必要とするサンプル数が少ないことを報告している。そこでこの考え方を本調査圃場に適応する。つまり$\varepsilon=5$％，$\alpha=5$％で無階層ランダム抽出と，モデル斜面による層別抽出を実施した場合の必要サンプル数について比較する。変動係数が30％のリン酸吸収係数では，無階層ランダム抽出の136に対して，層別抽出では95と減少する。また変動係数が10％と小さな乾燥密度に関しても，17から16へと必要抽出個数が少なくなる（表5）。徳永と深山は，事前に切・盛境界を判別することができないため，結果的に無階層ランダム抽出を基に算出した個数を方眼配分する方法を提案しているが，傾斜圃場の場合は，地形測量によって予めモデル斜面の分類とその面積比率を把握することができる。したがって圃場全体の代表値を抽出する場合，地形情報を用いることで精度の向上と省力化につながるのである。

しかし農地として画一的な土壌管理が困難となるほど

表-4　抽出方法別の必要測定数の比較

Table 4　Necessary sampling numbers of different sampling designs

	pH（H_2O）	pH（KCl）	全炭素含量	リン酸吸収係数	レキ含量	乾燥密度	可給水分量
ランダム抽出	8	10	236	136	436	17	158
最適配分抽出	7	9	148	95	231	16	137

危険率（α）＝5％
精度（ε）＝5％

表-5　地形特徴量を説明変数に用いた土壌特性の重回帰モデル

Table 5　Multiple regression models of soil properties by topographic attributes

全炭素含量	決定係数 0.4017		修正済決定係数 0.3816
説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	零仮説の検定（t値）
比流域	0.0072	0.3850	**4.691＞t（0.01）＝2.618
PROFC	−30.96	−0.2634	**3.467＞t（0.01）＝2.619
勾配	−5.13	−0.2639	**3.264＞t（0.01）＝2.620
標高	0.021	0.1429	1.877＜t（0.05）＝1.980
定数項	−2.30		0.678＜t（0.05）＝1.981

レキ含量	決定係数 0.4150		修正済決定係数 0.4054
説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	零仮説の検定（t値）
PLANC	211.01	0.5266	**7.564＞t（0.01）＝2.618
勾配	27.46	0.3453	**4.960＞t（0.01）＝2.618
定数項	0.88		0.654＜t（0.05）＝1.981

** ; 1％有意水準で零仮説が棄却されない

地点間での相違が大きいものと判断されれば，圃場全体について統計的に意味のある代表値が推定されたとしても実際の土壌管理において有効な情報とはなり得ない。例えば，最も小さな変動係数5.9％を示したpH（H_2O）でも，その空間分布はモデル斜面で類型化でき，InfとAtsでは標本平均で0.50の差が認められた（図4）。さらにレキ含量の分布に代表されるように，InfからAtsに向かって相対的に細粒質となり，全炭素含量も増加することから，酸性改良に必要な緩衝曲線もモデル斜面間で大きく異なってくるのは間違いない。したがって，空間配置を考慮しサンプル数を増やして精度の高い代表値が得られたとしても，作物生育の地点格差を解消するような土壌管理を実践することはできない。その解決のためには局所的な管理や改良が必要であり，モデル斜面に基づいてある程度まとまった領域毎に代表値を求めるべきである。

3.3.2 地形特徴量を用いた重回帰モデル

サンプリング密度が大きく，測定データが多いほど，土壌特性の分布を再現する精度は向上する。しかし，土壌分析には時間と労力を要するため，比較的簡便に得られる情報から土壌特性の分布を推定する方法を確立することは極めて有益である。そこで次に，地形特徴量を説明変数とする重回帰モデルについて検証する。相関関係が明瞭な全炭素含量とレキ含量について，地形特徴量を説明変数に用いて，変数の取り込みおよび除去のF値を2.0とした変数増減法により重回帰分析を行った。それぞれの重回帰モデルは表5に示すように，全炭素含量では4つの説明変数，レキ含量では2つの説明変数を持つモデル式となった。全炭素含量のモデルでは，説明変数に単相関では有意な関係が認められなかった標高が入っており，その回帰係数は負の値で単相関係数の符号と反対であるが，推定に関する寄与はそれほど大きくなく，計算上モデルの精度を高めるために採用されたものと考えられた。このモデルの決定係数は0.40，またレキ含量では0.42と，Moore *et al.*（1993）の得た重回帰モデルの決定係数，有機物含量で0.48, pH・可溶性リン・砂・シルトで0.41〜0.63と同程度であった。しかし説明変数として採用された地形特徴量，またその寄与の程度に関して相違が見られた。その違いは，特に勾配の重要性であり，彼らの対象とした圃場の地形変動が比較的緩やかであったことに起因すると思われる。地形変化の程度以外に，人為や気象等の作用が大きく異なることが，地形を用いた汎用的な重回帰モデルの構築を困難にしている。とは言うものの，ここでは地形の形態的な特性値である地形特徴量を用いることで，土壌特性分布をうまく推定できることを実証した。

4. まとめ

1.2 haの傾斜畑において基本間隔14 mの格子状に配列した155地点からサンプリングを行い，地形との関係からAp層の土壌特性の空間変動性について解析を行った。

実測データの統計処理結果から，特に全炭素含量や粒径組成などの土壌の素材特性値に関しては，相対的に変動が大きいことが認められた。これらの変動には地形情報から分類したモデル斜面ごとに有意差が認められ，斜面上部のInfやCcsでは相対的に全炭素含量が小さく粗粒質の土壌であり，斜面下部のCfsやAtsの土壌とは性状が大きく異なっていた。pH, 全炭素含量，リン酸吸収係数，乾燥密度やレキ，砂，シルト，粘土含量の土壌特性では，DEMから算出した地形特徴量との間に相関関係が認められ，それらの空間変動に関して地形が強く関与しているものと判断された。なお地形特徴量では勾配よりも凹凸が相対的に重要であることが認められた。

この様に土壌特性の空間分布は地形に対応したものであり，モデル斜面を用いて領域を区分することで，局所管理を前提とした土壌特性の代表値の抽出やサンプリングの省力化が可能になる。また説明変数に地形特徴量を用いて土壌特性分布を推定する重回帰分析を試み，地形との相関性の高い全炭素含量とレキ含量について有意な結果を得た。

謝　辞

本研究の土壌調査ならびにデータ解析に関しまして，ご指導いただきました佐久間敏雄北海道大学名誉教授に感謝申し上げます。

引用文献

Burgess, T.M. and Webster, R. (1980 a) : Optimal Interpolation and Isarithmic Mapping of Soil Properties, I The Semi-Variogram and Punctual Kriging. J. Soil Science, **31** : 315–331.

Burgess, T.M. and Webster, R. (1980 b) : Optimal Interpolation and Isarithmic Mapping of Soil Properties, II Block Kriging. J. Soil Science, **31** : 333–341.

Beckett, P.H.T. and Webster, R. (1971) : Soil Variability, Soils and Fertilizers. **34** : 1–15.

Dalrymple, J.B., Blong, R.J. and Conacher, A.J. (1968) : An Hypothetical Nine Unit Landsurface Model. Zeitchrift fur Geomorphologie N.F. Bd., **12** : 60–76.

Imade, A.S.W., Shibusawa, S., Sasao, A. and Hirako, S. (2001) : Soil Parameters Maps in Paddy Field Using the Real Time Soil Spectrophotometer. Journal of JSAM, **63** (3) : 51–58.

Journal AG. and Ch. J. Huijberegts (1978) : Mining Geostatistics. Academic Press.

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., Grayson, R.B. and Ladson, A.R. (1991) : Digital Terrain Modelling : A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. Hydrological Processes, **5** : 3–30.

Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A. and Peterson, G.A. (1993) : Soil Attribute 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.

Timlin, D.J., Ya. Pachepsky, Snyder, V.A. and Bryant, R.B. (1998) : Spatial 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.

Webster, R. and Burgess, T.M. (1980) : Optimal Interpolation and Isarithmic Mapping of Soil Properties, III Changing Drift and Universal Kriging. J. Soil Science, **31** : 505–524.

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.

安中武幸（1986）：転換畑圃場内における土壌物理性の変動．土壌の物理性，**53**：58–64.

柏木淳一（2003）：丘陵地における土壌断面形態の変動と地形解析の有効性．土壌の物理性，**95**：21–32.

河口至商（1973）：多変量解析入門Ⅰ．pp. 28–30，森北出版，東京．

徳永光一・深山一弥（1971）：関東ローム水田の含水比と乾燥密度の調査法について—農地土壌のサンプリングに関する基礎研究（Ⅶ）—．農業土木学会論文集，**36**：41–46.

徳永光一・佐藤照男（1975）：広域農地における土壌物理性の分布変動について—サンプリング法の基礎研究（Ⅰ）—．農業土木学会論文集，**55**：1–8.

長堀金造（1971）：児島湾干拓地水田の含水比と乾燥密度の不均一性—農地土壌のサンプリングに関する基礎研究（Ⅰ）—．農業土木学会論文集，**36**：1–7.

前田　隆・丸谷典弘・飯田晏弘（1971）：北海道の火山性土壌畑地の土壌水分量と乾燥密度の不均一性—農地土壌のサンプリングに関する基礎研究（Ⅷ）—．農業土木学会論文集，**36**：47–53.

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：2003年 8 月22日
受理年月日：2004年 1 月23日