

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

柏木 淳一*

Soil Profile Distribution and Terrain Attribute on a Hilly Site

Junichi KASHIWAGI*

* Graduate School of Agriculture, Hokkaido University

Abstract

The purpose of this study was to appreciate the spatial variability of upland soil profile on complex hillslope and to consider the adequacy of geomorphological information to explain the soil profile distribution. On a 1.2-ha upland field of central Hokkaido, Soil profile was investigated at 154 locations on a 14-m grid. Apparent differences were recognized according to the location on a slope position. In the landsurface model units of Interfluve and Convex Creep Slope, horizon sequence was Ap/C-type, the color of Ap-horizon soil in this area was relatively bright and coarse texture. In the units of Colluvial Foothlope and Alluvial Toeslope, horizon sequence was Ap/Ab/B/C-type, the Ap-horizon soil color was relatively dark and fine texture influenced by sedimentation. Terrain attributes, slope gradient, slope curvature, specific catchment area etc, calculated from the 7m-digital elevation model were highly correlated with A-horizon thickness except for slope gradient. Thick A-horizon was observed at the location which topographic conditions were convex slope, low altitude and high specific catchment area. The multiple regression model of A-horizon thickness by terrain attributes didn't have sufficient result for quantitative tool. However landsurface model units identified the A-horizon thickness distribution. Geomorphological analysis is useful to guide soil management system with consideration of spatial variability.

Key words : soil profile, spatial variability, terrain attributes, landsurface model units, geomorphological analysis

1. はじめに

丘陵地や複合斜面の長期にわたって耕耘された圃場では、土壌侵食による生産性の低下と、土壌の不均一化の進行による生産性のばらつきが増大し、一筆圃場としての耕作、管理が困難になっている (Onstard *et al.*, 1985, Timlin *et al.*, 1998)。この様な状況が著しい畑圃場においては、効率的な土壌管理を実践するに当たり、土壌の面的な把握が必要であり、そのための合理的な土壌評価法の確立が重要な課題となっている。

この不均一をもたらす主な原因は、土壌の侵食や堆積による土壌物質移動 (Carson and Kirkby, 1972) や斜面

に特有な側方流などの水分移動 (Kirkby, 1978) であり、地表面の形態変化 (地形変化) が密接に関連している。これら一連の移動現象の結果、山間地から低平地にかけて地形と密接に関連した土壌群**が形成されている。圃場内に見られる微地形変化も、土壌特性の空間分布に対して本質的には同様の作用を及ぼしていると考えられる。

地形学の分野では、地形の形態的な特徴により構造単位に区分する研究が進められてきた。Waters (1958) は既存の地形図と現地調査から凹凸の変化や勾配による地形分類を行っている。また Curtis *et al.* (1965) は土壌分野での利用を念頭に、凹凸を傾斜方向とそれに直交する

* 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

** 地形に応じた土壌群の規則的配列であるトポシークエンスやハイドロシークエンス

キーワード: 土壌断面, 土壌の空間変動, 地形特徴量, 斜面形態要素, 地形解析

方向に分けて評価し微地形の形態分類を行っている。この様に斜面形態を分類する試みの中で、Dalrymple *et al.* (1968), Conacher and Dalrymple (1977) は、New Zealand における土壌調査結果から、卓越する地質および土壌生成作用（溶脱やマスマーブメント等）を斜面の形態的な特徴と関係づけることで、一連の斜面を9つのモデル斜面に分類した。この様に斜面を形態から分類することで（それぞれの具体的な方法はまちまちであるが）、傾斜地における土壌水分（箱石 1960）、層厚や小麦の収量（Miller *et al.*, 1988）あるいは受食性（Daniels *et al.*, 1985, Kreznor *et al.*, 1989）等の様々な土壌特性の分布をうまく説明することができた。一方、斜面の形態を定量化する手法が Evans (1980), Zevenbergen and Thorne (1987) によって確立された。彼らは地表面を高度の関数として取り扱い、離散型の3次元の高度データ（Digital Elevation Model; DEM）から勾配や曲率といった地形形態の定量値（地形特徴量）を算出し、実際の地形に対して地形特徴量の分布を示した。このDEMを用いた地形特徴量について、Moore *et al.* (1991) は、土壌特性との関連性からその抽出方法について整理している。そして5.4 haの調査圃場において、15.24 m 間隔の正方格子型のDEMから算出した地形特徴量とA層厚やpH分布の関係について論じている（Moore *et al.*, 1993）。DEMの作成や入手あるいは地形特徴量の算出は容易であるものの、DEMの分割サイズに応じて地形の再現性が変化すること（Panuska *et al.*, 1991, Thompson *et al.* 2001）。現在の地形は進行中の土砂・水移動に関与しているが必ずしも過去の履歴を反映していない、また植生や気象条件によっても地形作用の程度は異なる、といった問題により地形特徴量を用いて層厚等の土壌断面の空間分布を予測・推定する定量モデルの構築には至っていない。

我が国の畑地帯は、多様な微地形変化を示す地形条件、水食が問題となる気象条件に広く展開している。しかしながら、土壌特性の空間分布を評価するために、地形・斜面要素の計量化を検討し、地形と土壌特性について言及した事例は少ない。そこで本研究では複合斜面からなる畑において、詳細な土壌調査により土壌断面形態の空間変動の実態を明らかにする。そしてDalrympleの提唱したモデル斜面分類から土壌断面形態の空間変動の特性について評価した。また、DEMを用いて地形特徴量の抽出を試み、得られた地形特徴量と土壌移動を反映するA層厚の空間変動との関係について解析することから、傾斜畑における土壌断面形態の空間分布に対する地形情報の有効性について検討した。

2. 調査圃場および調査方法

2.1 調査圃場

北海道中央部の美瑛町から富良野盆地にかけての地域は、幌内山地と十勝火山群によって囲まれた標高200～600 mの広大な火砕流台地をなし、北部の美瑛町から南部の富良野盆地に向かって標高が低下する緩波状丘陵地となっている。調査圃場はこの地域の幌内山地の山麓部に広がる北部丘陵地上の上富良野町草分地区に設定した。調査圃場は、耕作を開始してから80年以上経過した約1.2 haの古い傾斜地畑である。標高260 m～295 mの範囲にあり、北東向きの斜面で、15 m/60 m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（図1）。

土壌は熔結凝灰岩を母材とする残積性酸性褐色森林土で、風化層が浅く基盤が1 m以内にみられる上富良野統に分類されている（北海道立中央農業試験場, 1975）。

2.2 調査方法

圃場全体を包括するようにXY座標を設け、基本間隔14 mの格子点において土壌断面調査を行った。14 mメッシュに加えて、畑の主傾斜を横切る方向で最も長いトランセクトIと、主傾斜方向の稜線部付近と谷線部付近に位置するトランセクト（II, III）では、基本間隔の半分の距離7 mごとに調査地点を設けた（図1）。調査は1988年8月20日に全地点の試坑を掘り、計154ヶ所の土壌断面調査を完了するには4日間を要した。断面調査は深さ80 cmの試坑を設け、日本ペドロロジー学会の提唱する方法に準じて層位を分類し層毎に、土色やレキ含量を記載した。

2.3 斜面の形態・位置による分類（モデル斜面）

Dalrympleの考え方を調査圃場に適用して、縮尺1/1,000の地形図上で等高線の間隔および形状から次の5つのモデル斜面に分類した（図2）。すなわち斜面上部から、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）が連続して複合斜面を形成していると仮定した。なおInfはDalrympleが区分した側方浸透斜面（SEEPAGE SLOPE）まで拡張した領域とした。残りの3つのカテゴリーは、本調査区には含まれていないか、含まれていてもごく狭い範囲に限られると思われるので対象から外した。

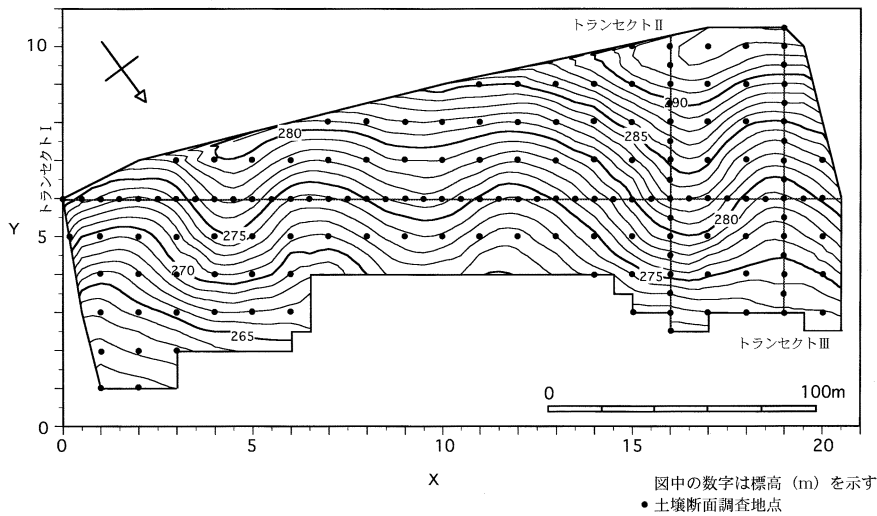


図-1 調査圃場の概要と土壌断面調査地点

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

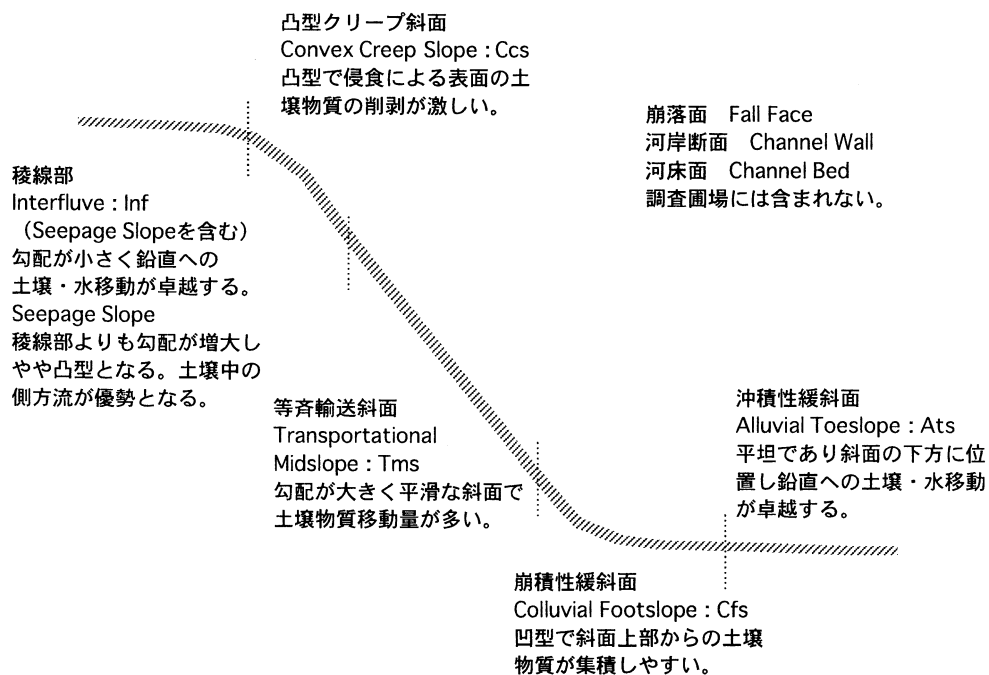


図-2 モデル斜面の概念図

Fig. 2 Schematic representation of the landsurface model units.

2.4 地形特徴量の算出

地形解析に用いた縮尺 1/1,000 の地形図は、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。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、これを 3 次ス
プライン補間法により補間を行い、正方形格子間隔を 3.5

×3.5 mとした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。

図3に示すように、高度方向をz座標として、水平面上にxy座標を設け、各地点の標高をZi, 格子間隔をλとし、高度についての水平距離による微分を離散形で表すと、

$$f_x = \frac{\delta z}{\delta x} \approx \frac{z_6 - z_4}{2\lambda}$$

$$f_y = \frac{\delta z}{\delta y} \approx \frac{z_2 - z_8}{2\lambda}$$

$$f_{xx} = \frac{\delta^2 z}{\delta x^2} \approx \frac{z_4 + z_6 - 2z_5}{\lambda^2}$$

$$f_{yy} = \frac{\delta^2 z}{\delta y^2} \approx \frac{z_2 + z_8 - 2z_5}{\lambda^2}$$

$$f_{xy} = \frac{\delta z}{\delta x \delta y} \approx \frac{-z_1 + z_3 + z_7 - z_9}{4\lambda^2}$$

x軸から反時計回りの方向θにおける勾配 (SLOPE) は、

$$SLOPE = f_x \cos \theta + f_y \sin \theta$$

δSLOPE/δθ=0の時、勾配の最大値 (以下勾配と略す) とその方向がそれぞれ以下の様に定まる。

$$\sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad \tan^{-1}(f_y/f_x)$$

また方向θにおける勾配の変化率 (CURVATURE) は、

$$CURVATURE = f_{xx} \cos^2 \theta + f_{yy} \sin^2 \theta + 2f_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

よって勾配の最大値の方向のCURVATURE (PROFC) は、

$$PROFC = (f_{xx}f_x^2 + f_{yy}f_y^2 + 2f_{xy}f_x f_y) / (f_x^2 + f_y^2)$$

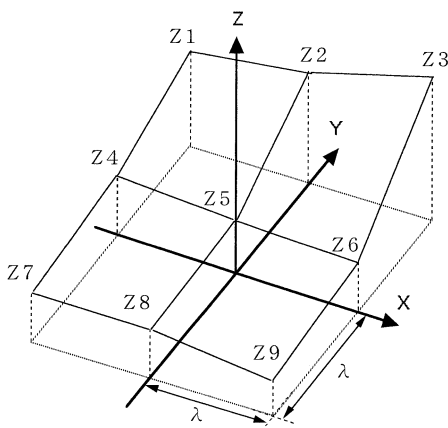


図3 地形特徴量の算出に関する概念図 (3×3 格子点)

Fig. 3 3 by 3 submatrix of grid-based digital elevation model.

PROFCと直交する方向 (PLANC) では、

$$PLANC = (f_{xx}f_y^2 + f_{yy}f_x^2 - 2f_{xy}f_x f_y) / (f_x^2 + f_y^2)$$

となる。したがってこれらの変化率は、負の時は凸型を正の時は凹型の斜面を意味し、絶対値の大小で凹凸の程度を示す地形特徴量である。また拡散方程式による地形発達モデルにおいて重要な標高の二次微分であるラプラスアン (LAPLACIAN) は、

$$LAPLACIAN = f_{xx} + f_{yy}$$

となる (野上と杉浦, 1986)。これらの地形特徴量は、3×3の格子点から算出された地形情報であり、より大きなスケールの地形上における相対的な位置関係を含んだものではない。そこで、本研究では、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) を求めることとした (Speight, 1980)。すなわち、比流域は、計測する地点で勾配と直交する方向へ計測点を中心に7mの線分を引き、その両端から斜面上方への落水線 (等高線と直交する) を稜線まで描き、それらの曲線により閉じた領域の面積を線分の長さで除した値である。つまり各地点における流域面積に対応した指数となる。

3. 結果と考察

3.1 調査圃場の地形解析

調査圃場における地形をモデル斜面に分類した結果を図4に示す。本調査圃場においては、主傾斜と直交する方向にもおおよそ0.04で傾斜しており、西側に向かって Inf-Ccs-Tms-Cfs-Ats が交互に現れながら高くなる波状性丘陵地である。西側の斜面では、CcsからAtsにかけての境界線間隔が狭くなっており、Atsが斜面の上部まで入り込んでおり斜面形態の変化が急である。それとは対照的に Inf を挟んだ中央部の斜面では、TmsとCfsが大きく広がっている。調査地全体の面積割合は Inf, Ccs, Tms, Cfs, Ats でそれぞれ5.6%, 19.3%, 33.6%, 21.8%, 19.7%でTmsが最も広く分布していた。

勾配は、範囲が0.014~0.346と非常に大きく、平坦面から普通畑としての耕作が非常に困難である急斜面までを含んでいる。勾配の平均値は0.237であり、0.200以上の斜面が調査圃場全体の80%を占めていた。勾配の空間分布を図5に示す。0.300以上の急斜面は Inf 周辺のCcsからTmsにかけての部分に偏在しており、特に西側では広範囲に分布していた。一方0.100以下の緩斜面はAtsの部分に認められ、最も標高の大きな Inf の一部も平坦面となっていた。InfからAtsにかけての勾配変化は、0.200から0.250以上の急斜面となり0.100以下の緩斜面へと連続的に減少する傾向を示しており、なかでも西側の斜面では勾配の変化が激しく、中央部では勾配

が0.100から0.200と、その変化が緩やかであるといった特徴がみられた。

勾配の変化率に関しては、いずれの方向とも約60%の領域が正の値であり、いわゆる凹型の斜面を構成していることが認められた。それらの分布は、PROFCに関してはInfを中心にCcsにかけて凸型を示す斜面の領域が広がっていたが、0.001以上の凹型の発達した斜面は散在しておりモデル斜面により特定することはできな

い。また凹型でも0に近い値がほとんどであるためその程度は比較的小さく、表面流出水の流送力が急激に減少するような斜面条件にはないものと考えられる。PLANCでは、変動の幅が大きくTmsの斜面上方ほど凸型、Atsにかけての斜面下方では凹型となる傾向を示した(図6)。この値は流出水の集中・発散に関与しており、大きな値ほど多量の土壌物質が集中しやすい環境にあるといえるが、条件を満たす領域はCfsとAtsの大部

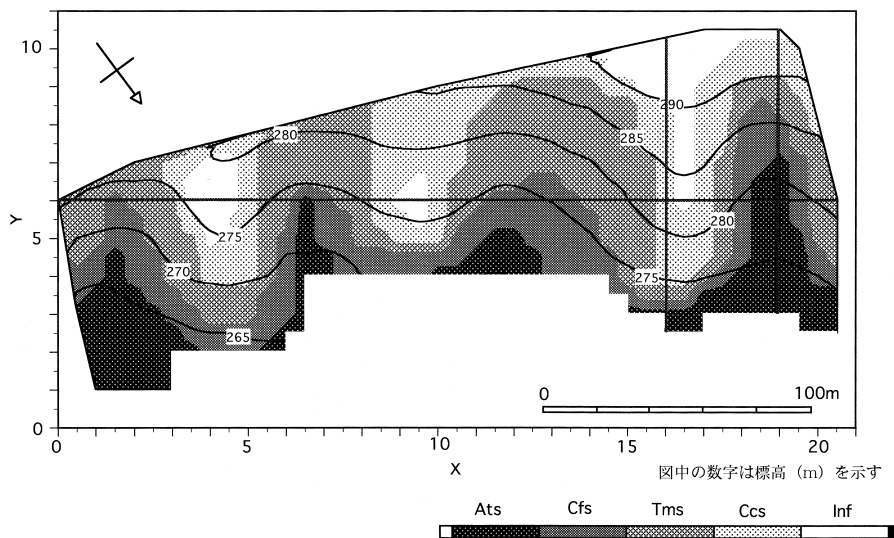


図-4 モデル斜面の空間分布

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

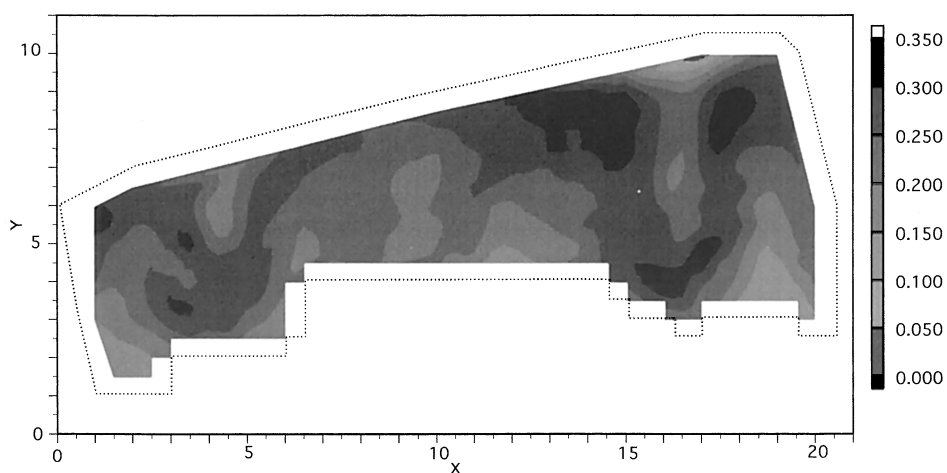


図-5 調査圃場における勾配の空間分布

Fig. 5 Spatial distribution of slope gradient at the investigation area.

分と、加えて西側の斜面では Tms に分類した斜面の上部にもその分布が認められた。

3.2 土壌断面調査結果

図7にトランセクト I における地表面の変動と土壌断面を示す。このトランセクトは調査地のほぼ中央で、主

傾斜を横断する方向に設定した。地表面は標高 273 m ~ 283 m の範囲で、3つの稜線と4つの谷線をもち周期的変動を示しており、地点 (16.5, 6) 付近にピークにもつ斜面が最も高所に位置している。モデル斜面ごとに類型化しそれぞれの特徴について評価する。Inf, Ccs では削

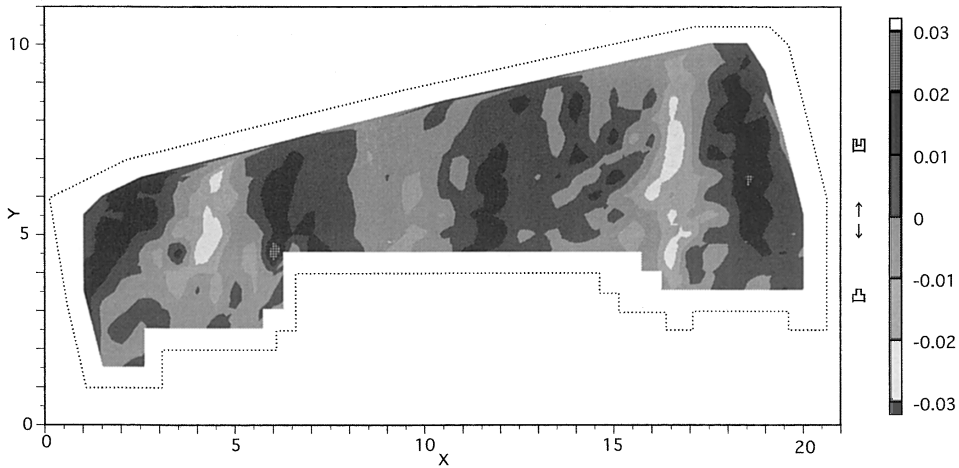


図-6 調査圃場における PLANC の空間分布

Fig. 6 Spatial distribution of plan curvature at the investigation area.

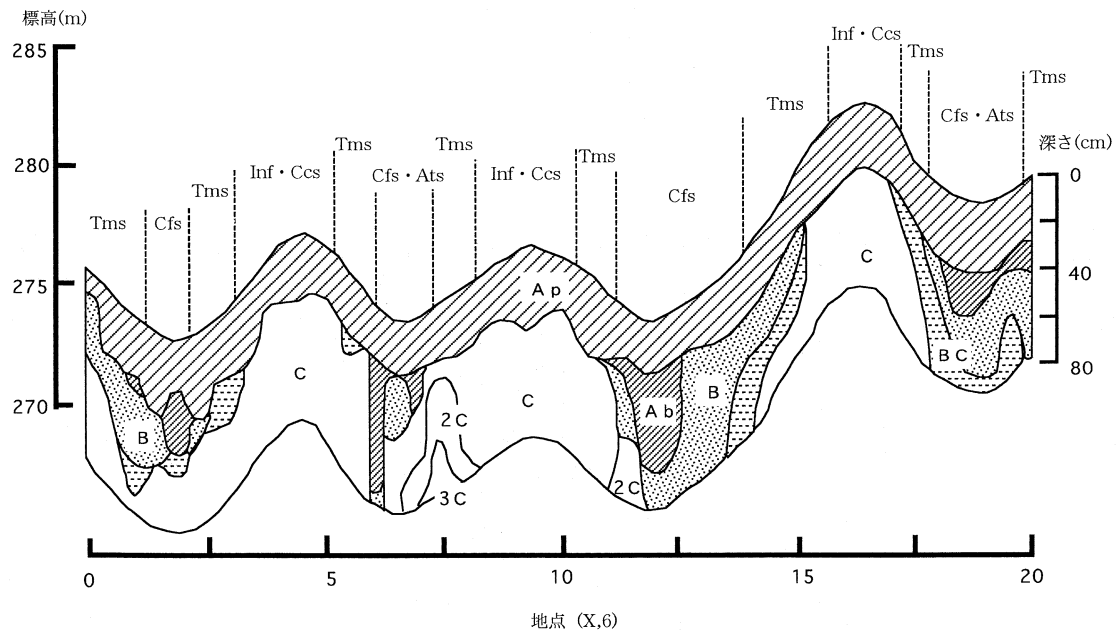


図-7 代表横断面 (トランセクト I) における土壌断面

Fig. 7 Soil profile along the transect I.

剥により Ap 層が薄く、その直下に C 層が現れていた。また、ここでの Ap 層は中粒質（砂壤土）で土色も黄褐色（10YR5/8）、褐色（10YR4/4）の明度の高い色調を呈し、流亡した表土を耕耘によって機械的に補ってきたために多量の下層土（B、C 層）が Ap 層に混入していると思われた。そして斜面の下方に向かって、Tms では Ap 層の下に B 層が出現し、Cfs、Ats では厚い B 層または Ab 層が確認された。Cfs、Ats の Ap 層は暗褐色（10YR3/3）から褐色（10YR4/4）で、Inf、Ccs の Ap 層に比べて明度が低く、混在するレキが少なく、細粒質であった。Cfs、Ats に分類された 4 ケ所の凹部には斜面上部からの流入物からなる Ab 層が偏在しており、特に凹部の中心（谷線）ではなくその上方に最も厚い Ab 層が認められた。これはガリ侵食を修正した形跡であり、地点（6、6）では Ab 層の下部境界の深さは 75 cm で特に厚かった。この地点の地形条件を地形特徴量により評価すると、PLANC は 0.016 で集水地形が発達しており、勾配は 0.25 以上でかつ傾斜方向が急激に変化するという特徴が認められた。したがって、大きな降雨強度条件下においては斜面上部からの表面流去水が集水し、大きな送流力を維持したまま一気に斜面下方に流れる。このために V 字形に下刻したガリ侵食が生じたものと判断した。また谷線を挟んだ地点（7、6）でも同様に厚い A 層が認められ、その直下は C 層となっており、ガリ侵食によって完全に B 層まで流亡していた。

トランセクト II は稜線付近に位置しており、大部分が Ccs に分類される。トランセクト I と同様に Ccs では層序は Ap/C となっており、その Ap 層の性状は明度が大きくレキに富む特徴が認められた。Ab 層は斜面下端の Ats に見られたにすぎず、このトランセクトにおいては土壌侵食作用が卓越していたと判断された。一方、トランセクト III は斜面底部のほぼ中央に位置しており、半分以上が Cfs に分類される。この Cfs を中心とした部分では Ab 層が認められ、Ap 層の土色は暗褐色（10YR3/3）となっていた。そして Ab 層の存在する領域は、地形特徴量の PLOFC が凹型を示す部分に対応していた。また斜面下方の Cfs から Ats にかけての下層においてはグライ班が認められ、土壌水分が集水しやすい環境にあることを示していた。

以上のように、調査圃場内で認められた層序はモデル斜面によって分類することで、その分布が明らかになった。Inf と Ccs では B 層の消失した Ap/C 型であり、Ap 層は下層土の混入により中粒質で明るい土色を示す。一方、斜面下方の Cfs、Ats では細粒質で暗色な Ap 層で、その直下は Ab 層（特に Cfs）または B 層となり、深さ 80 cm 以内では C 層が存在しない Ap/Ab (B) 型となっていた。そして Tms は層序が漸変する領域であり、Ap/C 型と Ap/B/C 型が混在していた。

3.3 A 層厚の空間変動

次に土壌侵食および堆積作用の結果を反映している A (Ap+Ab) 層厚に注目し、その空間分布特性について地形特性との関係から定量解析を試みた。表 1 に A 層厚の基本統計量を示す。A 層厚は平均値が 34.0 cm で変動係数が 39.7% と大きく、12.5~80.0 cm の広い範囲をとり変動している。700~6,000 ha の起伏の緩やかな洪積台地に広がる畑地帯において調査した徳永と佐藤（1975）は、表土厚の変動係数は 30~34% であると報告している。また勾配の範囲が 0.01~0.30 で侵食により形成された波状地形を示す開析台地上の 8 ha の区画において調査を行った Miller *et al.* (1988) は、表土厚の変動係数として 35.6% を示した。本圃場での値はこれらよりも大きく、対象領域の拡大に伴い変動性が增大する事を考慮すれば、単一の畑圃場として A 層厚は非常に大きなバラツキを持つと判断された。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、20~35 cm 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。

A 層厚はこの様にバラツキの程度が激しいが、その空間分布は図 8 に示すように領域ごとにまとまっており、地形条件との対応関係が推察された。そこで個々の地形特徴量との相関分析を行ったところ、勾配以外の特徴量との間には有意な相関関係が認められ（表 2）、凹型が発達した、大きな比流域を持つ低地に厚い A 層が形成されることが示された。この結果は相対的に地形変化が緩

表-1 A 層厚の基本統計量

Table 1 Statistical parameters of A-horizon thickness

平均	標準偏差	分散	尖度	歪度	最小	最大	標本数	変動係数
34.0	13.50	182.19	1.56	1.34	12.5	80.0	154	39.7

* 80 cm 以上のデータ（1 地点）は 80 cm として統計処理を行った。

やかな畑圃場を対象とした Moore *et al.* (1993) や Park *et al.* (2001) とほぼ一致しているが、両者が勾配との間に有意な負の相関を認めている点については異なっている。同じ圃場を対象として行った土壌侵食量調査では、 ^{137}Cs 蓄積量と勾配については有意な負の相関が認められており、勾配の大きな地点ほど侵食量が多いとしている (柏木と佐久間, 1995)。この相違は、勾配の大きな侵食相においては下層土の混合により人為的に Ap 層の厚さを補っており、また相対的に勾配の小さな Ats では厚い A 層の発達が見られなかったため、A 層厚と勾配の関係が見られなかったと考えた。

地形特徴量は、Panuska *et al.* (1991) が指摘するように、微分を差分におきかえ計算を行うため算出に用いる DEM の区間分割の大きさによりそれぞれの値は変化する。そこで正方格子間隔を 3.5 m, 7 m, 14 m, 21 m, 28 m とし算出した地形特徴量と A 層厚について相関分析を行った。間隔に対して相関関係は変わらなかったが、相関係数の絶対値は、格子間隔の増大に伴って大きくなり 14 m 間隔で最も大きく、以後減少に転ずるといった結果を得た。したがって本調査圃場の地形では、

A 層厚分布を推定する地形情報として 14m-DEM による地形特徴量が適当であると判断した。しかしながら、調査圃場はその形が複雑であり、格子間隔を増大すると外縁付近では地形特徴量を算出できないために標本数が急減する。そこで、7m-DEM の地形特徴量を説明変数に用いた重回帰分析により A 層厚の定量モデルについて検討を試みた。その結果は、表 3 のように PLANC, 標高, 比流域を説明変数とした重回帰式が求められた。決定係数は 0.352 であり、Moore *et al.* (1993) が導いた勾配を説明変数に含めたモデルの 0.503 よりも小さいが、勾配と比流域の関数 (wetness index), PLOFC, 集水面積の地形特徴量を説明変数に用いた Park *et al.* (2001) のモデルの 0.362 と同程度であった。しかし、回帰の残差について検討したところ、正規分布が棄却され、特に 60 cm 以上の層厚に対しては残差が大きくなることが認められた。これは 60 cm 以上の堆積相には、前述のようにガリの人為的な埋戻しによるといった形成要因が異なる地点も含まれていることが、その要因として考えられる。しかしながら、この回帰式による推定値は実測値の分布傾向と対応しており、また実測値と推定値に関する

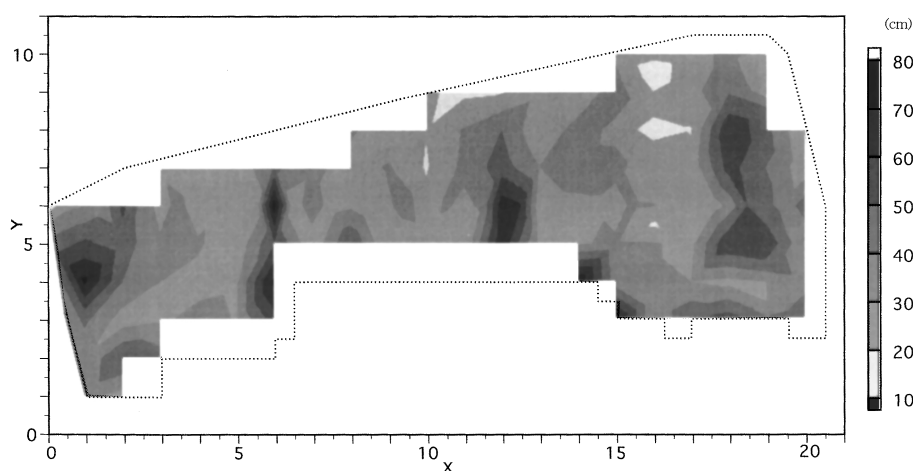


図-8 調査圃場における A 層厚の空間分布

Fig. 8 Spatial distribution of A-horizon thickness at the investigation area.

表-2 A 層厚と地形特徴量の相関係数

Table 2 Correlation coefficient between A-horizon thickness and terrain attributes

	勾配	PROFC	PLANC	LAPLACIAN	比流域	標高
Ap+Ab 層厚	-0.1354	0.37**	0.51**	0.48**	0.38**	-0.36**

** : 有意水準 1% で無相関が棄却される項目

順位相関係数 (Snedecor and Cochran, 1972) は 0.56 を示したことから、A 層厚の分布の傾向を再現する定性的なモデルとしては満足のいくものであった。

一方、分散分析によりモデル斜面ごとに層厚を比較したところ、表 4 に示すようにそれぞれの水準間に有意差が認められた。つまり斜面上部の Inf, Ccs では標本平均で 25 cm 程度の層厚であるのに対し、斜面下部の Cfs, Ats ではその値は 40 cm 以上になっていた。また Tms より斜面の下方では変動性が大きくなり、変動係数では 30% 以上で Tms には 70 cm 以上のデータも含まれていた。各水準内の分布が正規分布に従うとすれば、Inf, Ccs の 85% が 30 cm (全体の代表値: 最頻値・中央値) 以下であり、対照的に Cfs, Ats では 85% が 30 cm 以上であると説明することができる。

表-3 地形特徴量を説明変数に用いた A 層厚の重回帰モデル

Table 3 Multiple regression model of A-horizon thickness by terrain attributes

説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	決定係数
PLANC	538.77	0.40	0.3520
標高	-0.49	-0.24	
比流域	0.04	0.17	
定数項	166.11		

3.4 モデル斜面と地形特徴量の関係

これまでに土壌断面特性の変動性と分布状況を解析するために、地形情報としてモデル斜面と地形特徴量を用いてきた。モデル斜面は、主要な土壌の生成や移動現象の変化が斜面の形態に対応していることに基づいて分類されており、Dalrymple は斜面の勾配や凹凸の目安も提示している。本研究においてもモデル斜面は、等高線の形状から斜面形態を推察して分類しており、地形特徴量とは独立な関係ではない。そのため DEM から算出した地形特徴量に基づいて斜面を形態的に分類し、それぞれのモデル斜面を当てはめることは可能である。Pennock *et al.* (1987) は勾配と PROFC と PLANC の地形特徴量によって 7 つの斜面要素に、Park *et al.* (2001) は集水面積と凹凸 (勾配の変化率や曲率とは異なる) の 2 つの地形特徴量によって、6 つの斜面要素に、それぞれ分類するアルゴリズムを提案している。そして土壌層位の厚さや深さの分布と検証することで、その有効性を評価している。しかしここで用いている閾値は対象とした地形に固有の値で試行錯誤で求めなくてはならないのが現状であり、かつ他の地形変化に対する適用事例はない。今回の場合においては、モデル斜面ごとに地形特徴量を集計したところ、方法の箇所の説明した斜面形態の特徴を再現することができた (表 5)。しかし、勾配が大きくその変化が激しいためにある閾値を定めて、画一的に分類することは困難であった。

圃場内、特に傾斜地のように土壌のバラツキが大きい

表-4 モデル斜面による A 層厚の類型化

Table 4 Identification of the A-horizon thickness using landsurface model unites

基本統計量					
水準	Inf	Ccs	Tms	Cfs	Ats
件数	14	36	51	27	26
平均	26.04	24.61	32.61	44.13	43.44
標準偏差 (σ)	5.16	4.80	10.12	16.59	13.55
平均 + σ	31.20	29.41	42.73	60.72	57.00
平均 - σ	20.87	19.81	22.49	27.54	29.89
分散分析表					
要因	偏差平方和	自由度	平均平方	F 値	
因子 A	9248.8	4	2312.21	18.50 > 3.45 = $F_{(4,149)}(0.01)$	
誤差	18626.9	149	125.01		
全体	27875.7	153			

最小有意差法による差の検定結果
 Inf ≠ Cfs, Ats
 Ccs ≠ Tms, Cfs, Ats
 Tms ≠ Cfs, Ats

表-5 モデル斜面と地形特徴量の関係

Table 5 Explanation of landsurface model unites with terrain attributes

	勾配	PROFC	PLANC	LAPLACIAN	比流域	
Inf						勾配では20%が0.15以下
平均	0.187	-0.0057	-0.0117	-0.0174	14.3	PROFC, PLANCでそれぞれ75%, 95%が
分散	0.0024	0.00006	0.00006	0.00008	104.25	凸型を示す
標本数	75	66	66	66	10	ラプラシアンでは, 95%が凸型を示す 比流域では80%が20以下
Ccs						勾配では85%が0.20以上
平均	0.240	-0.0030	-0.0078	-0.0107	17.1	PROFC, PLANCでそれぞれ70%, 90%が
分散	0.0016	0.00003	0.00007	0.00014	61.16	凸型を示す
標本数	297	286	286	286	32	ラプラシアンでは80%が凸型を示す 比流域では75%が20以下
Tms						最も勾配が大きくほとんど0.20以上
平均	0.272	0.0013	0.0016	0.0029	31.0	PROFCで65%が-0.005~0.005, PLANC
分散	0.0010	0.00003	0.00006	0.00015	298.13	で80%が-0.01~0.01と平坦な斜面である
標本数	532	509	509	509	46	ラプラシアンでは50%以上が-0.01~0.01 比流域では85%以上が50以下
Cfs						勾配では85%が0.20以上
平均	0.233	0.0033	0.0040	0.0073	54.8	PROFC, PLANCでそれぞれ80%, 70%が
分散	0.0011	0.00002	0.00005	0.00010	1257.99	凹型を示す
標本数	341	325	325	325	26	ラプラシアンでは80%が凹型を示す。 比流域では50%が50以上
Ats						最も勾配が小さく0.20以下が70%
平均	0.176	0.0038	0.0066	0.0104	126.3	PROFC, PLANCでそれぞれ80%, 80%が
分散	0.0014	0.00002	0.00004	0.00009	8527.61	凹型を示す
標本数	238	213	213	213	19	ラプラシアンでは85%が凹型を示す 比流域では70%が50以上

場合は、土壌管理や改良、精密農法に代表されるような施肥管理や土壌侵食防止対策等にとっては土壌分布情報は重要である。より正確な土壌分布図が理想ではあるが、ある程度まとまった領域ごとに土壌特性の区間推定、つまりモデル斜面による評価でも目的の達成のために十分に寄与できる。したがって、地形特徴量の分布を加味してモデル斜面を分類し、モデル斜面ごとに土壌特性を類型化することは有効な手段である。今後、多様な地形形態を含む圃場における検証とデータの蓄積が望まれる。

4. 要 約

耕作を開始してから80年以上経過した古い傾斜地畑において、圃場全体を包括するように基本間隔14mのメッシュ法により154地点において土壌断面調査を行っ

た。また地形図より地形特徴量の抽出ならびに地形の形態に基づいたモデル斜面に分類し、土壌断面形態との関係について検討した。

調査地の地形は、4つの凹部と3つの凸部により構成される複合斜面である。一連の斜面は下方に向かってInf, Ccs, Tms, Cfs, Atsが連続しており、凸型で勾配の小さなInfからCcsにかけて勾配が増大し、Tmsでは勾配が最も大きく比較的平坦な斜面となり、Cfs, Atsでは凹型で勾配の減少する様な地形変化が認められた。また平均勾配は0.237であり、0.200以上の斜面が調査圃場全体の80%を占めていた。

土壌侵食と再堆積により、土壌断面形態の変動が著しいことが確認された。その変動についてモデル斜面ごとに評価すると、Inf, Ccsの地点ではAp/Cの層序を示し、激しい削剝作用によりB層が流亡した侵食相であ

る。Ap層はC層の材料を多く含んでいるために、明度、彩度ともに大きな土色であり中粒質で粘性の低い土壌であった。それに対してCfs, AtsではAp/Ab/Bの層序を示しAp層はより暗色で細粒質な土壌で構成されていることから堆積相と考えられる。A (Ap+Ab)層厚に関しては変動係数が39.7%と大きなばらつきが認められたが、その空間分布については地形特徴量により説明することができる。厚いA層の出現する領域は、比流域が大きく低地の流去水が集中しやすい凹型斜面であり、勾配とは明瞭な関係は認められなかった。そしてこの層厚分布を定量的に推定する試みとして、地形特徴量による重回帰分析をおこない、PLANC、標高、比流域を説明変数とする重回帰モデルを得たが、定量モデルとしては十分なものではなかった。一方モデル斜面により、 $Ccs < Inf < Tms < Ats < Cfs$ の順にA層が厚くなり、Inf, Ccsの85%が30cm以下の層厚で、対照的にCfs, Atsでは85%が30cm以上であると類型化することができた。

地形条件の他にも、地域性つまり土壌シリーズ、気象条件や人為作用などに応じて土壌断面形態と地形の関係は変化するものと考えられる。そのため地形情報による土壌断面に関する定量モデルの構築は単純ではない。しかし、地形情報の収集および特徴量の抽出は容易であり、傾斜畑における土壌の空間分布を推定するために大いに活用すべきであると考えられる。

謝 辞

本研究の土壌調査ならび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

- Carson, M.A. and Kirkby, M.J. (1972) : Hillslope Form and Process, Cambridge University Press.
- Conacher, A.J. and Dalrymple, J.B. (1977) : The Nine Unit Landsurface Model : An Approach to Pedogeomorphic Research, *Geoderma*, **18** : 1-154.
- Curtis, L.F., Doornkamp, J.C. and Gregory, K.J. (1965) : The Description of Relief in Field Studies of Soils, *J. of Soil Science*, **16** : 16-30.
- Dalrymple, J.B., Blong, R.J. and Conacher, A.J. (1968) : An Hypothetical Nine Unit Landsurface Model, *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Bd.*, **12** : 60-76.
- Daniels, R.B., Gilliam, J.W., Cassel, D.K. and Nelson, L. A. (1985) : Soil Erosion Class Landscape Position in the North Carolina Piedmont, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49** : 991-995.
- Evans, I.S. (1980) : An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping, *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Bd.*, **36** : 274-295.
- Kirkby, M.J. (1978) : Hillslope Hydrology, JOHN WILEY & SONS.
- Kreznor, W.R., Olson, K.R., Banwart, W.L. and Johnson, D.L. (1989) : Soil, Landscape, and Erosion Relationships in a Northwest Illinois Watershed, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **53** : 1763-1771.
- 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** : 1,133-1,141.
- 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 Attribution Prediction Using Terrain Analysis, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57** : 443-452.
- Onstard, C.A., Pierce F.J., Dowdy R.H. and Larson W. E., (1985) : Erosion and Productivity Interrelations on a Soil Landscape, *TRANSACTIONS of the ASAE*, **28** : 1885-1888.
- Panuska, J.C., Moore, I.D. and Kramer, L.A. (1991) : Terrain Analysis : Integration into the Agricultural Nonpoint Source (AGNPS) Pollution Model, *J. of Soil and Water Conservation*, **61** : 59-64.
- 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., Zebarth, B.J. and DeJong, E. (1987) : Landform Classification and Soil Distribution in Hummocky Terrain, Saskatchewan, Canada *Geoderma*, **40** : 297-315.
- Snedecor, G.W. and Cochran, W.G. 著, 畑村又好他訳 (1972) : 統計的方法, 185-187, 岩波書店.
- Speight, J.G. (1980) : The Role of Topography in Controlling Throughflow Generation : A Discussion, *Earth Surface Processes*, **5** : 187-191.
- Thompson, J.A., Bell, J.C. and Butler, C.A. (2001) : Digital Elevation Model Resolution : Effects on Terrain Attribute Calculation and Quantitative

- Soil-Landscape Modeling, *Geoderma*, **100** : 67-89.
- 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.
- Waters, R.S. (1958) : Morphological Mapping, *Geography*, **43** : 11-17.
- 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.
- 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, *農業土木学会論文集*, **55** : 1-8.
- 野上道男・杉浦芳夫 (1986) : パソコンによる数理地理学演習, 108-111, 古今書院.
- 箱石 正 (1960) : 傾斜地の土壌水分勾配について, *土壌の物理性*, **3** : 30-33.
- 北海道立中央農業試験場 (1975) : 地力保全基本調査成績書.

受稿年月日 : 2002 年 11 月 29 日

受理年月日 : 2003 年 6 月 17 日