

筑波森林水文試験地の地下構造の推定

清水晃・壁谷直記・延廣竜彦（森林総研）・張建軍（北京林業大）・
久保田多余子・阿部俊夫（森林総研）

Abstract : We estimated the subsurface structure of Tsukuba forest experimental watershed located at Tsukuba mountain system using investigation data based on surface wave and drilling survey. This watershed has four sub-catchments which possess deep soil and weathered layer. In order to grasp subsurface structure three-dimensionally, the surface fitting was first performed using the detailed geodetic data. The surface contour map was produced using the grid raster file made by fitting, and each watershed boundary was decided based on the map for whole watershed and sub-catchments. The same procedure was applied for the first layer and second layer beneath ground level, and the grid raster file and subsurface contour map were generated. Watershed boundaries were fixed using the subsurface contour map and surface topography was compared with geographical feature below ground for the whole watershed and sub-catchments from a viewpoint of runoff analysis. In addition, the information about several unknown hydrological characteristics such as slope, thickness, soil layer volume, weathered layer volume and pore volume in subsurface zone was acquired quantitatively.

Keywords : surface wave, subsurface structure, GIS

要旨：茨城県筑波山系の森林総合研究所筑波森林水文試験地において、表面波探査およびボーリングによる調査データを用いて流域の地下構造の推定を行った。本流域は深い土層・風化層を有する流域で試験地内に4箇所のサブ流域が存在する。地下構造を3次元的に把握するために、詳細な測量データを使用して最初に表面地形の作成を行った。計算手法は空間統計手法の中で山地地形の再現に有効であると報告されているKriging手法を選定し、流域の精密なグリッド情報を生成した。このグリッドラスターファイルを用いて地表面地形図を作製し、流域全体及び試験流域内のサブ流域を対象に表面地形に基づいた流域界を確定した。続いて表層地形の解析に使用した手法を流域の地下1層（土壌層：表土ローム層）および地下2層（強風化層）を対象に適用し、各層のグリッドラスターファイルを生成した。これに基づいて作成される地下等高線図を用いて流域界を確定し、流域全体およびサブ4流域を対象に表面地形と地下地形の整合性を検討した。加えて、地下各層の傾斜、層厚、体積、孔隙量などの水文特性についてこれまで未知であった情報が定量的に得られた。

キーワード：表面波探査、地下構造、GIS

I はじめに

筑波森林水文試験地は一般的な山地小流域とは異なり、深い土壌層および風化層を有する流域である。このため、流域の水収支解析において水年が単年度を超える場合があることがすでに認められている(2)。したがって、本流域の水文解析においては通常の土層厚を有する小流域で一般的に行われる流量測定や土壌層の水分移動などの観測に加えて、基盤となる地下部の情報をできる限り正確に把握しておくことが厚い地下層での貯留や流出に関する解析を行う場合に非常に重要であると考えられる。また、本試験地では流域内に本流のみならず4箇所のサブ流域を対象に流出観測を行っており、個別サブ流域の流出解析においても地下構造情報は非常に有益なものに

なると考えられる。

このような観点から、本研究では茨城県筑波山系の森林総合研究所筑波森林水文試験地において、表面波探査およびボーリングによる調査データを用いて流域の地下構造の推定を行った。流域全体を対象に調査された地下層位データに基づき、空間統計手法を適用して詳細なグリッド情報を生成し、流域全体ならびにサブ流域の集水範囲の変動や流域の土層・風化層の層厚、保水量などを検討した。

II 対象流域と調査方法

1. 対象流域 対象流域は森林総合研究所所管の筑波森林水文試験地である。筑波森林水文試験地は、東経140

度18分、北緯36度20分に位置し、筑波山系南部水戸森林管理署217林班に属する。総流域面積は今回の解析に基づいて正確なものに修正されており、3.7602ha（これまで試験地作成時の3.786haを使用）である。標高は290～390m、平均傾斜24度、方位Nで、流域の地質は黒雲母片岩が大部分を占め、一部花崗岩類の貫入が見られる。これらの基盤及びその風化物の上に、関東ロームが厚く堆積している。土壤は褐色森林土壤が発達している。従来の貫入試験などの調査から表層土壤深は2～3mから6～7mあり、比較的均質に分布している。植生はスギ・ヒノキの人工林を主体とし、尾根部に保残帶として落葉広葉樹林が一部混在している。流域内にはサブ流域として土砂流出観測対象流域（SSサブ流域：面積は3.299ha）、流域右岸側から順にAサブ流域（面積：0.6309ha）、Bサブ流域（面積：0.9581ha）、Cサブ流域（面積：0.3863ha）の4サブ流域があり、量水観測をはじめとする各種水文観測を行っている。また、降水量については、流域の出口にある量水施設の屋上に設置した降水量観測装置でデジタル測定を続けている。

2. 調査方法 通常の森林小流域の場合には、土層深が1.5mから2m程度であるため、流域界にかかる表面地形と基盤地形はほぼ一致している。しかしながら、本試験流域は既存のボーリング調査によって最大で20mを超える深い土層・風化層を有することがわかっている。したがって、水文解析を進める上で流域内部の地形構造と表面地形との対応に関する情報は、非常に重要な要素であると考えられる。これまでにもこのような視点から簡易貫入試験による大貫ら(4)の表層土層に関する調査が行われているが、深部を含めた多点を対象とする調査は壁谷ら(3)の表面波探査を使用した調査まで待たれていた。本報告では、壁谷らの表面波探査により流域内の多点で得られた土層分布状況と既存のボーリング調査結果を一つのデータセットとして用いた。地下部をボーリング柱状図により、表面土層を代表する地下1層（土壤層：表土ローム層）と風化層上部を代表する地下2層（強風化層）に大別し、流域界の変動や層厚および保水量などについて検討した。

地下構造を3次元的に把握するために、詳細な測量データを使用して最初に表面地形の作成を行った。この際、空間統計手法の中で山地地形の再現に有効であると報告されているKriging手法(1)を採用し、流域の精密なグリッド情報(x, y, z座標)を生成した。具体的な手順は以下のとおりである。まず、現地測量による観測点のポイント情報をテキストファイル化してGISソフトウェアであるTNT-Mipsに3次元データとしてインポートし、これらのデータをポイントベクター化した。次にKriging手法により、このベクターファイルを使用してグリッドデータ(0.5mグリッド)を生成し、これを有

するラスターファイルを作成した。このラスターファイルを基盤の地形情報として一連の解析作業を進めた。

このようにして作成されたグリッドラスターファイルを用いて地表面地形図を作製し、流域全体及び試験流域内のサブ流域を対象に表面地形に基づいた流域界を確定した。通常は、この流域界が全試験流域およびサブ流域の流域界として使用されるが、本流域のような厚い土層・風化層を有する地域では詳細な水文解析の基盤流域情報として、地表面の流域界と地下の流域界の整合性を確認することが流出解析精度の有効性や向上の観点から非常に重要なこととなる。したがって、表層地形の解析に使用した手法を流域の地下1層および地下2層を対象に適用した。使用した資料は、表面波探査データおよびボーリングデータを統合した調査データである。この結果、表面地形と同様に地下1層及び地下2層のグリッドラスターデータを生成することができ、これに基づいて作成される地下等高線図によって流域界を確定し、流域全体およびサブ4流域を対象に表面地形と地下地形の整合性を検討した。

また、層別の各流域界の確定によって流域面積や平均傾斜などをはじめとする地形要素や地下各層の厚さ（深さ）および土層・風化層の体積なども算出可能となり、大貫・吉永(4)による有効間隙率の情報を使用した各層の孔隙量推定等も行い、地下構造に基づく流域の水文特性を検討した。

なお、作成された地形図は地表面については詳細な測量データに基づいているため、0.1m精度の3次元座標デジタルデータセットを基盤としているが、地下地形については0.5m～1.0m精度のデータセットに基づいたものとなっている。

III 結果と考察

1. 表面地形 詳細な現地測量調査の結果、地表面地形図が作成され、試験地内のサブ流域の形状や面積が確定した（図-1、表-1）。図-1の示すように流域内には4箇所のサブ流域があり、それぞれ量水観測を継続している。厚い土層を有する本試験地では、年間を通じて比較的安定した基底流出が維持されるが、各サブ流域独自の流出特性により、流域間には差異が見出されている(2)。これらの流出特性については、表面地形のみならず地下構造の影響を受けていることが予想され、次節以降で地下1層から順に対象流域の表面地形との対応状況や推定平均層厚などについて考察する。なお、表面地形は特に流域の土壤浸食機構に深く関係しており、土壤浸食・流送・堆積計算モデルにはすでに適用しており、その結果は清水ら(5)によって発表されている。

2. 地下1層の構造 図-2は、地下1層の等高線図である。表面地形と同様に試験流域内の4箇所のサブ流域

も区分されており、表面地形での流域界と異なる集水範囲が認められる。Aサブ流域は地下集水面積が地表面よりも増大しており（表-1），特に右岸流域界の拡張は流域全体の流域界の拡張を伴っており、全流域面積を増加させている。これに対してBおよびCサブ流域は地下1層では流域面積が減少し、特にCサブ流域はかなり大規模に集水範囲が縮小しており、地表面地形との不整合が現れている。壁谷ら(2)の報告を考慮すると、Aサブ流域とBサブ流域は面積の変更により、全流域からの流出観測結果に近接した流量（水高単位）になると予想される。一方、Cサブ流域はやや大規模な集水範囲の減少により、流量算出結果が流域全体に比較してやや過大になることが予想される。このような小面積サブ流域についてはさらに詳細な検討が必要である。しかしながら、流域全体の地下1層を対象とした地形推定結果は壁谷ら(2)の報告との整合性が増加する傾向を示しており、流域面積の推定はおむね妥当なものと考えられた。

3. 地下2層の構造 地下2層の等高線図は図-3のとおりである。図-2と比較すると流域全体の形は、地表面の集水域に近いものとなっている。これはAサブ流域の右岸側の流域界が縮小して、地表面境界に近づいたためで表-1によると地下2層の全流域面積も地表面流域

面積よりもやや小さくなっている。しかしながら、Aサブ流域の流域面積は地下1層よりもさらに拡大している。これはAサブ流域の集水範囲が地表面と大きく異なる左岸側に拡大したことから生じており、地下2層の地形は本サブ流域においては地表面と著しく異なることが判明した。Bサブ流域は地下1層よりもやや小さくなっているが、極端な差異はなく地下1層の流域とほぼ類似した地下流域を呈した。Cサブ流域は地下1層よりも若干縮小したが、ほぼ地下1層と同じ流域範囲を有しており、その傾向自体には変動はなかった。

4. 各層の地形・水文特性 表-1から流域全体では、各層の平均厚は地下1層3.29m、地下2層3.98mで地下2層が約1.2倍程度深い結果となった。また、表層から地下2層までを一括して平均すると層厚は7.27mとなり、強風化層までの深さは少なくとも7m以上であることが推察された。各サブ流域も基本的には同様の傾向であった。また、傾斜についてはサブ流域ごとに差異が存在しているが、地表面が地下層よりも平均的に急傾斜になっていることがわかった。各層の体積を計算すると層厚に対応して地下2層が地下1層の約1.2倍大きくなっていること、地下1層の有効間隙率を0.3、地下2層の有効間隙率を0.2とすると(4)、表-1のような流域の孔隙量が算

表-1 流域の地形および地下特性

		全流域	Aサブ流域	Bサブ流域	Cサブ流域	SSサブ流域
流域面積(ha)	表面地形	3.7602	0.6309	0.9581	0.3863	3.0299
	地下1層	3.824	0.7733	0.7594	0.2268	2.9983
	地下2層	3.6838	0.8933	0.7306	0.2113	2.7558
平均標高(m)	表面地形	349.66	348.36	370.61	341.05	351.00
	地下1層	346.59	344.03	369.73	339.13	348.14
	地下2層	343.00	346.44	365.16	334.79	348.94
平均厚(m)	地下1層	3.29	2.14	3.18	1.66	3.58
	地下2層	3.98	4.29	3.83	3.34	3.69
	表層-地下2層	7.27	6.79	7.07	4.97	7.29
平均傾斜(度)	表面地形	31(Max48)	32(Max48)	29(Max48)	34(Max48)	31(Max48)
	地下1層	28(Max42)	28(Max35)	26(Max35)	31(Max48)	28(Max42)
	地下2層	28(Max42)	28(Max35)	27(Max35)	29(Max35)	28(Max42)
体積(m ³)	地下1層	121906	12872	24005	3739	105842
	地下2層	145585	26617	27479	6899	101189
孔隙量(m ³)	地下1層	36572	3862	7202	1122	31753
	地下2層	29117	5323	5496	1380	20238
孔隙量(mm)	地下1層	956	499	948	495	1059
	地下2層	790	596	752	653	734
	計(mm)	1746	1095	1700	1148	1793

* 1 有効間隙率は地下1層で0.3、地下2層で0.2とした

* 2 表層-地下2層はこの2層間の厚さをグリッド集計した

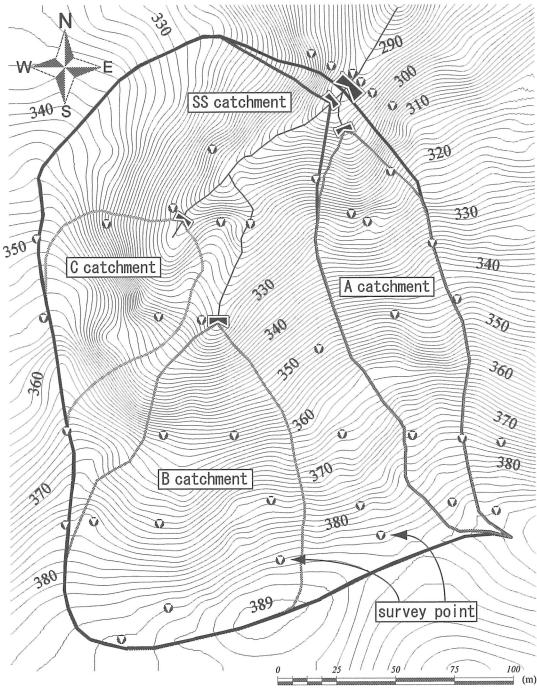


図-1 対象流域の表層地形と流域界

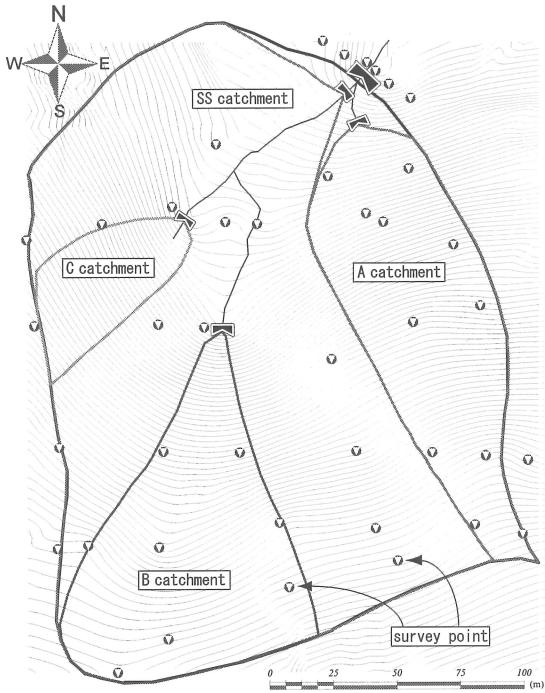


図-2 対象流域の地下1層地形と流域界

定された。これを地下層の流域面積で水高換算すると流域全体で地下1層では956mm、地下2層で790mmとなつた。合計すると1746mmであるが、これらの地下層では通常、不飽和状態であり、孔隙量の約1/3程度の水を貯留すると仮定すると、観測資料の年間流出量約600mmとほぼ同じ程度となつた。

N まとめ

試験流域の地下構造は、基本的には表面地形と類似し

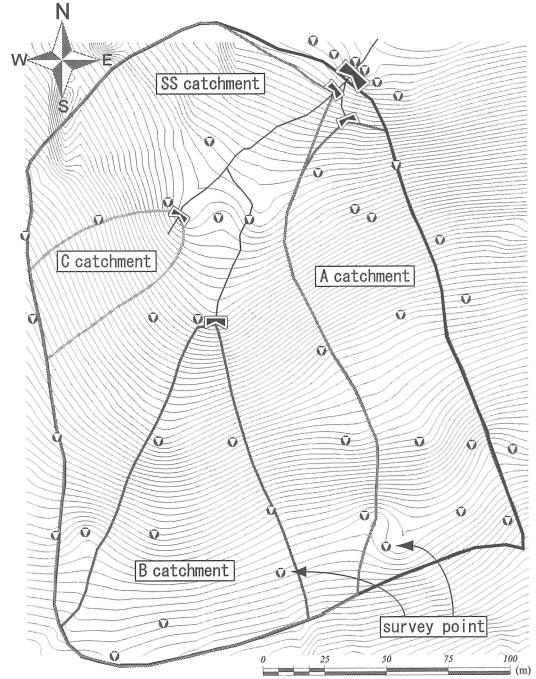


図-3 対象流域の地下2層地形と流域界

た傾向を持つが、表面地形には崩壊や侵食・堆積などの影響が直接反映されているため、地下の基盤流域の流域界とは一致しない部分が見られた。特に、サブ流域の面積や範囲（流域地形）に関しては、地下層ごとに変動が見られ、流出解析にはこれらを考慮することが基本的に不可欠であると認められた。また、地下各層の傾斜や層厚、体積や孔隙量などの水文特性についてこれまで未知であった情報が定量的に得られたことは今後の流出解析やモデルパラメータの同定において非常に有意義であると思われた。今後は、地表面地形との対応に問題が見られた箇所などを中心に推定精度の向上を進め、流域全体で正確な推定が行われるように改良を進める予定である。

引用文献

- (1) CRESSIE, N. A. C. (1990) The origin of Kriging. Mathematical Geology 22 : 239–252.
- (2) 壁谷直記ほか (2004) 厚い風化層を持つ森林小流域における流出特性に関する研究(I). 日本森林学会大会学術講演集 115 : 806.
- (3) 壁谷直記ほか (2005) 筑波森林水文試験地における表面波探査を用いた地盤調査. 日林関東支論56 : 251–252.
- (4) 大貫靖浩・吉永秀一郎 (1995) 筑波共同試験地理小流域における土壤の分布とその保水・流出特性にかかる物理的特性. 森林総研研報369 : 189–207.
- (5) 清水 晃ほか (2005) GISを使用した土砂流出モデルの森林小流域への適用. 日林関東支論56 : 299–302.