

第三紀丘陵の小河川における低水時流量の地域的分布とその要因

Low-Flow Characteristics of Hilly Basins Underlain by Unconsolidated and Stratified Formations

東京大学生産技術研究所 正員 虫明功巨
日本工営K.K. 正員 村上雅博
東京大学生産技術研究所 正員 小池雅洋

1. はじめに

「丘陵」は慣用的な言葉で、厳密な定義はないようである。本稿では、第三系から第四系にかけての海成堆積層を基盤とする丘陵（便宜的に第三紀丘陵と呼ぶ）を検討の対象とする。こうした丘陵は、わが国の平野の周辺部に広く分布し、従来は採草地や新炭林地など疎放な土地利用がなされ、そのため水文学の立場からも従来あまり研究対象とされなかった。しかし、大都市周辺では1960年前後から、地価の安さと土工の容易さから、大規模土地開発の対象とされ著しく改変が進んでいる。表1は、日本住宅公団の大規模開発地を地質別に整理したものである。これを見ても、大規模土地開発に占める第三紀丘陵の地位が理解できるであろう。さらに、三全総においても丘陵は有力な開発可能地として位置づけられている。

一般に第三紀鮮新世以後の丘陵は、砂、礫、シルトなど透水層と難透水層が互層をなす比較的規則的な地下構造をもつ。この点が、山地河川とは異った水文学的流域特性であり、特に地下水流出にそれが反映される。本稿では、まず、自然丘陵地河川の低水時流量観測を基に流域の地下構造と地下水流出との関係を明らかにする。さらに、丘陵の既開発地において同種の検討を行うことにより、開発に伴う地下水流出機構の変化について議論する。

2. 自然丘陵地河川の地下水流出と流域の地下構造との対比

調査の対象とした流域は、千葉県君津市、木更津市東方の上総丘陵を流れる小糸川（流域面積146㎢）と矢那川（36.8㎢）、および東京都八王子市南東部の多摩丘陵の別所川（1.4㎢）である。基盤はいずれも第三紀鮮新世以後の海成堆積層であり、大局的に見れば関東造盆地運動の中心である渡良瀬遊水池の方向に下る傾斜をなしている。

2.1 上総丘陵の小糸川流域

(1) 流域の地下構造

上総丘陵は、鴨川町と勝山町を結ぶ古第三紀の嶺岡層群を中軸として、北へ向って新第三紀中新世、鮮新世、第四紀洪積世と、順次新しい地層が現われ、それらは北下りの緩い傾斜をもって地中に没している。小糸川流域においても、上流から下流へと新しい地層が露われる。最上流域には中新世の泥岩が分布し、以下清澄層（砂岩、泥岩互層）、

表1. 大規模開発地の地質別の面積とカ所数

上段：面積ha，下段：（カ所数）

地域 地質区分	首都圏	中部・関西	九州	札幌	仙台	静岡	計	百分率
沖積平野	1,517 (21)	185 (4)	51 (2)	389 (1)			2,142 (28)	8.4%
洪積台地・段丘	9,243 (55)	298 (1)					9,541 (56)	37.5
第三系～ 第四系丘陵	4,768 (24)	7,815 (41)	125 (3)		123 (2)	118 (1)	12,949 (71)	50.9
マサ化花崗岩		72 (1)	339 (4)				411 (5)	1.6
中・古生層	115 (1)	201 (2)	79 (2)				395 (5)	1.6
計	15,643 (101)	8,571 (49)	594 (11)	389 (1)	123 (2)	118 (1)	25,438 (165)	100.0

黄和田層（泥および砂，泥互層），梅が瀬層（砂礫層および砂，泥互層），国本層（泥岩および砂泥互層）と続き，中流部以下は図1に示す地層が表われる。図1中のX-X'の地質断面の模式図を図2に示す。小糸川流域は，地層の帯水層の性格の観点から，国本層より上流域と市宿層より下流域に大別される。前者をⅠブロック，後者をⅡブロックと呼ぶことにすると，Ⅰブロックでは相対的に固結度が高く，地形も急峻で，表層にロームの被覆はみない，Ⅱブロックは，Ⅰに比較して新しい地層であり，固結度が低く，地形も緩やかで部分的にロームで覆われている。特に粗砂でできた市宿層は，層厚と地表露出面積ともに大きく，この地域の上総掘自噴井の取水層となっている。

（２） 冬季過水期流量測定結果と流域の地下構造の対比

1974年1月27日，本，支川の10数地点において流量測定を行った。この冬は，関東地方で無降雨記録を更新した年で，測定日まで50日以上降水をみなかった。したがって，測定流量は地下水流出成分である。支川の観測結果は，図1中表示してある。全体的にみると，Ⅰブロックの0.7～0.9 mm/日に対して，Ⅱでは1.2～3.9 mm/日とバラツキはあるがⅠに比べてかなり大きい。バラツキの原因は，市宿層下流域に多数分布する自噴井のためと考えられ，その数約1,000本，自噴総量は約1 m³/秒と推定されている。

本川筋の測定間の流出高を図3に示す。Ⅰブロックでは1 mm/日前後であるのにⅡブロックではいずれの区間もかなり大きな値を示す。自噴井の分布と流入径路は明らかではないが，下流域Ⅱブロック全体で自噴総量を考えると約1 mm/日に相当し，Ⅱブロックの平均流出高2.6からこの影響を差し引いても1.6 mm/日とⅠブロックより大きな値である。上流域Ⅰと下流域Ⅱのこうした流出高の差は，地層の新旧に起因する固結

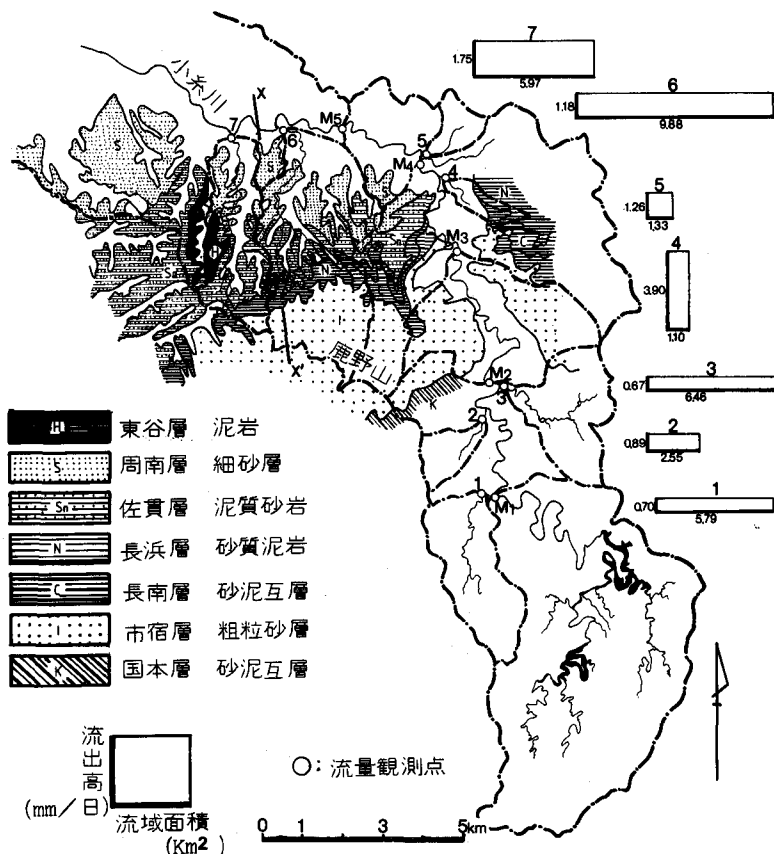


図1. 小糸川下流域の地質の概要および冬季流量観測結果

度の相違に求められるものと推論される。

2.2 上総丘陵の矢那川流域

(1) 流域の地下構造

この流域は、小糸川流域を北に接し、より新しい未固結の堆積層で構成される。図4、5に地質平面と断面を示すが、地層は全体的に北下りに傾斜している。河川への地下水流出と関連をもつ地層は、表2の通りで、いずれの層もシルト、粘土、砂、砂礫が互層をなす。表中には、100cc円筒資料による透水係数と有効間隙率が示されている。

透水係数をみると、砂層はシルト・粘土層の10~100倍の値であり、有効間隙率も砂層の22~29%に対して、シルト・粘土層では3~10%である。すなわち、各地層の砂ならびに砂礫層が帯水層として優れた性質を示すのに対して、それぞれの層中のシルト・粘土層が難透水層を形成している。

(2) 冬季渇水期流量測定結果と流域の地下構造との対比

1976年2月に図4に示す10支川で流量測定を行った。結果は同図中に示されている。流出高は、南から北に流下する支川(№1~4, 8~10)すなわち地層の傾斜と同じ傾きを持つ流域において全般的に高いと見なされる。各支流ごとに地質縦横断面図を作成して、流出高と地下構造との対応関係を調べたが、ここでは、流出高が最大を示す№8と最小を示す№6の支川について説明する。

図6、7はそれぞれ支流域№8と№6の河道方向とそれに直交する方向の地質断面である。両流域を構成する地層はいずれも上部に姉ヶ崎層を被った藪層であるが、河道方向に対する地層の傾斜および河道と各地層の位置関係が異っている。№8で

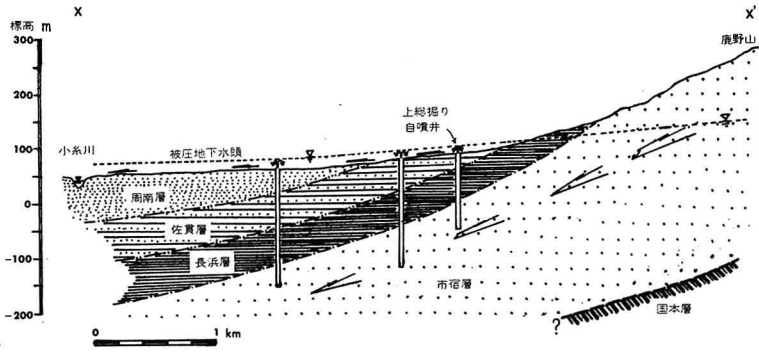


図2. 地質断面模式図(図1のX-X'断面)

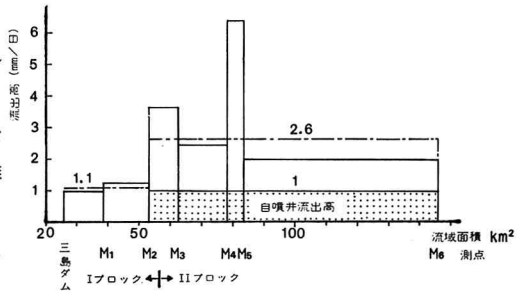


図3. 小糸川本川筋の区間流出高

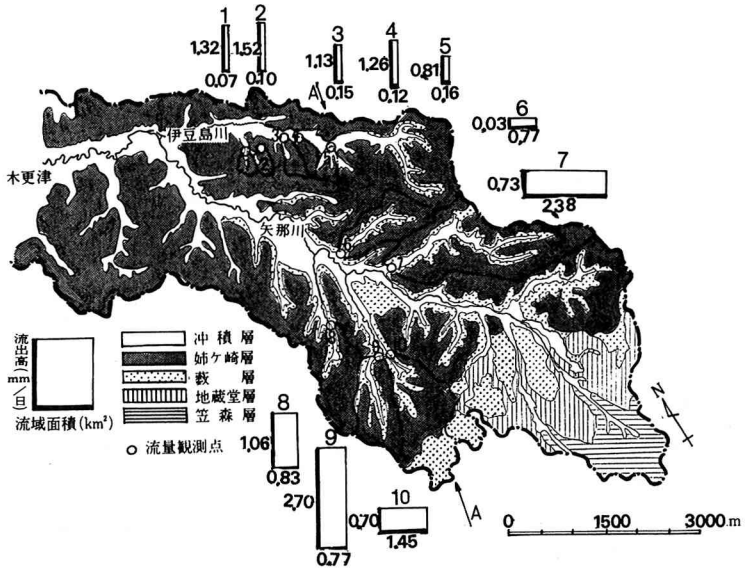


図4. 矢那川流域の地質の概要および冬季流量測定結果

は、河道勾配とほぼ平行に地層が傾斜しており、しかも河床付近に難透水性のシルト層(Ym)が位置する。つまり、シルト層上の砂層からの地下水流出を流路が受ける形になっている。この流域の露頭では、Ym上の砂層から地下水が盛んに浸出し流下しているのが観察される。これらが、この流域で渇水期流出高が2.7mm/日と大きい理由と考えられる。

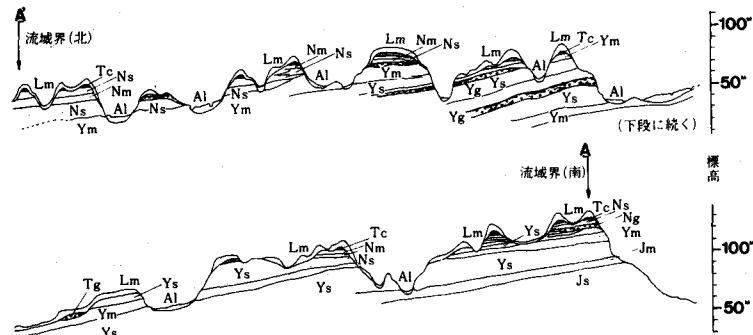


図5. 地質断面(図4のA-A'断面)

表2. 矢那川流域の地層と水理特性

いっぽう、支流流域6では、地層の主傾斜は左岸から右岸へと河道に直交する方向で下り、流路は左岸流域からの地下水流出しか受けない。さらに、河道は上流部でシルト層(Ym)を下刻し、中流部以下ではその下位の砂層(Ys)中を流下する。このため、このYs層からの地下水流出はほとんど受けず、むしろ上流からの表流水が下流部で河床に浸透している可能性がある。これらの条件が、流域6で渇水期流出高が0.3mm/日と小さい理由と考えられる。

地層名	記号	地質構成	試料名	間隙率 %	有効間隙率 %	透水係数 cm/sec
新期ローム層 (立川・武蔵野ローム)	Lm	風化火山灰土		80	11	
段丘礫層 (武蔵野礫層相当?)	Tg	砂 礫				
常総粘土層 (松戸粘土層)	Tc	凝灰質粘土				
成田層 (成田層相当?)	Nm	シルト・粘土 (一部砂層を伴う)				
	Ns	砂 (砂層を主とする部分)	成田層上部	58	26	4.0×10^{-3}
	Ng	砂礫 (Ng)	成田層中部	60	22	5.7×10^{-4}
	Ng(sg)	礫混り砂 (Nsg)	成田層下部	60	22	5.7×10^{-4}
数層	Ym	シルト・粘土(一部シルト 勝ちの砂泥互層を含む)	数シルト層	56	3	3.2×10^{-5}
	Ys	砂(一部砂に富む砂泥 互層)	数砂層	54	28	3.3×10^{-3}
	Yg	砂礫～礫混り砂				
群地蔵堂層	Jm	泥 岩 (固結シルト粘土)	地蔵堂シルト層	53	10	5.9×10^{-4}
	Jat	泥 岩 砂 互 層				
	Js	砂	地蔵堂砂層	52	29	6.1×10^{-3}
	Jg	砂 礫				
笠森層	Km	泥 岩 (砂岩・泥岩互層有り)	笠森シルト層	53	10	2.0×10^{-4}
	Ks	砂	笠森砂層	53	22	1.7×10^{-3}

註) 有効間隙率は、吸引試験において $pF = 2.0$ までの容積の全容積に対する割合

他の支流流域についても同様な検討を行うことにより、難透水性のシルト層上部の砂層や砂礫層から地下水流出を受ける流路において流出高が高く、そうした条件がない支川で低いことが明らかにされている。

2.3 多摩丘陵の別所川流域

(1) 流域の地下構造

多摩丘陵は一般に、砂、砂礫、泥層が互層をなす三浦層群とこれを不整合に覆う御殿峠礫層、おし沼礫層、および関東ローム層で形成され、基盤の三浦層群は全体的に北東に下る傾斜をもっている。

別所川流域では、図8に示すように、上位から関東ローム(L, LT)、御殿峠礫層(G)、稲城砂層(I)、連光寺互層(RA)および平山砂層(HS)を主な構成地質としている。関東ローム層は水文地質の立場から大きく2つに大別できる。上部のローム層(立川ローム層と武蔵野ローム層上部)は粘土化が弱く、その下部は強度に粘土化が進んでいる。ボーリング調査の土質名の呼称に習って、前者をローム層、後者を火山灰質粘土層と呼ぶことにする。火山灰質粘土層は、比較的幅の広い尾根で地形にほぼ相似な形で分布している。

この層中には透水係数 10^{-6} cm/s オーダーを示すものもあり、難透水層をなしており、この層の上部に不圧地下水がある。それより下位の層の中で、連光寺互層中の泥層(RAmd)は緻密で固結度が高く、透水係数は 10^{-7} cm/s 以下である。この流域では、これら2つの層が不透水性基盤をなし、その上部で地下水流動が起きていると推察される。

連光寺互層上面の等高線を図9に、地形との関係を見るために立体模式図を図10に示す。図でわかるように、この泥層は別所流域の上流部では地中に没し、中・下流域では河床あるいは崖に露われる。中・下流域の露頭を観察すると、泥層上部の砂層から湧水や浸出水の見られる箇所が多い。また、中・下流域E～Aの支流谷地は強度の湿地を呈している(地下水位が高い)が、こうした谷地では地表からあまり深くない所に連光寺泥層があるという共通性が見られる。

(2) 冬季湧水期流量測定結果と流域の地下構造との対比

1977年12月～78年2月の冬季湧水期に本、支川19地点に流量観測堰を設け、1週間間隔で流量測定を行った。観測期間内で最湧水を示す1978年2月24日の流出高を図11に挙げる。実測流出高の大小によって、観測点を3つのグループに分けることができる。すなわち、グループⅠ：観測点NA, HA—長期無降雨が続くと流出量が枯渇することがある。グループⅡ：観測点Eu, G, Hu, Ms, Ia, Iu—いずれも中流域に属し最小流出高は0.2mm/日前後の中間的な値を示す。グループⅢ：観測点Al, Au, Cl, Cu, D, El—いずれも下流域に属し最小流出高は0.5mm/日前後の相対的に大きな値を示す。

流量測定結果に現地踏査による観察も加味して、図11には上記各グループを概念的に地帯区分してある。この地帯区分は、流域の地下構造をい換えれば帯水層と難透水層の層序と流路の位置関係によく対応している。グループⅠは、上流域に位置し、火山灰質粘土層上の不圧地下水からの流出が供給されるに過ぎない。この不圧地下水の流域界は地表流域界とほぼ一致していると見なせるから、帯水層の規模は比較的小さい。これがグループⅠの地帯で湧水期流出高が小さい理由である。

グループⅢは、連光寺泥層の上面が河床あるいはそれより高い所に露われる地帯である。また、この泥層は別所流域の流域界を超えて南東方向の地下に拡っており、地下水流域の規模が大きい。しかも、右岸側A～Eの支川では河床と泥層の傾斜方向が一致し、流路が泥層から上の地下水の流出を受ける形となっている。これらが、グループⅢで湧水期流出高が相対的に大きい理由である。

本川筋の流出高に着目しても同様なことが言える。連光寺泥層上面は本川の流下方向とほぼ同じ方向に傾いているが、谷の勾配1/40に対して泥層上面の勾配は約1/50と緩やかで、図10でわかるようにH沢合流点付近で河床上に露われる。その上流側の観測点M₅と下流側のM₄の流出高を比較すると、この間で流出高が急に増大していることがわかる。これは前述した地下水流出機構で説明できるであろう。

グループⅡは、両者の中間的位置に属し、ローム層中の不圧地下水、御殿峠礫層などの帯水層から流出を受けると考えられる地帯である。

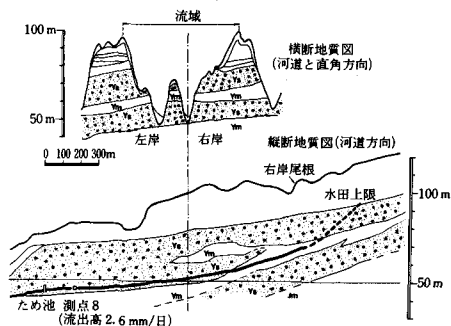


図6. 支流No.8の地質断面

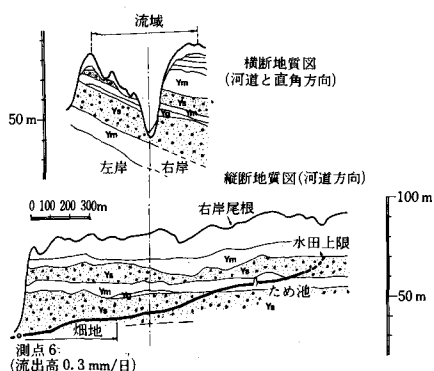


図7. 支流No.6の地質断面

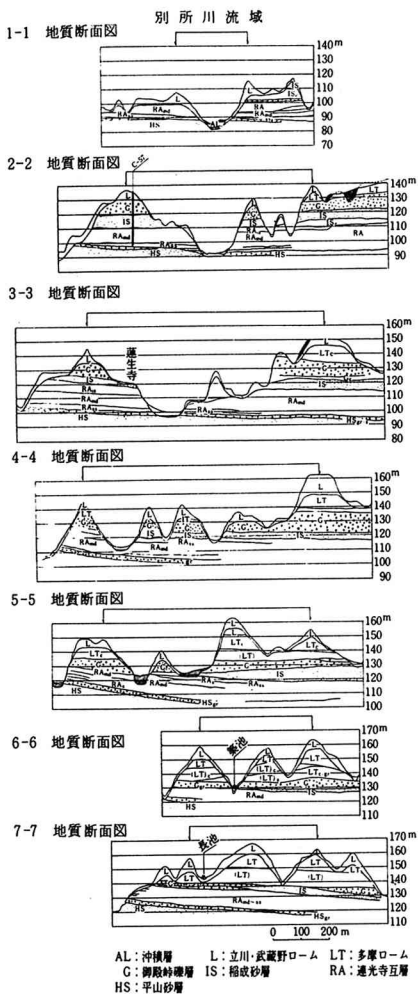
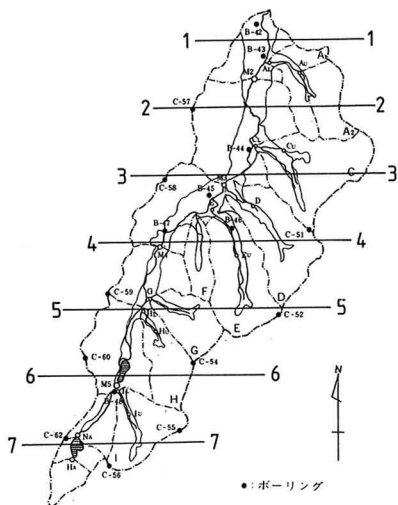
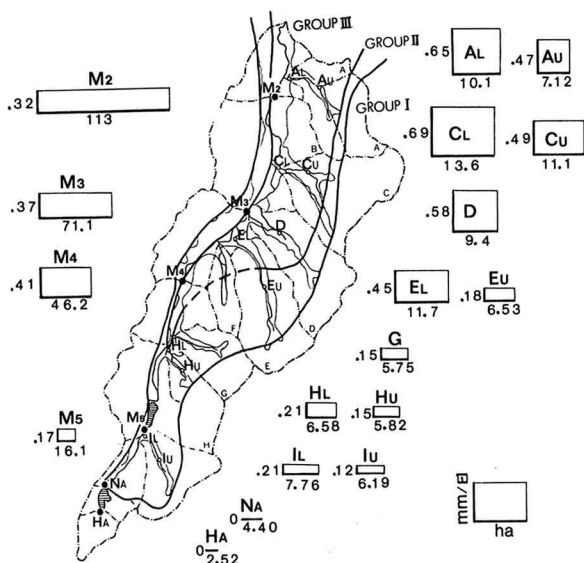
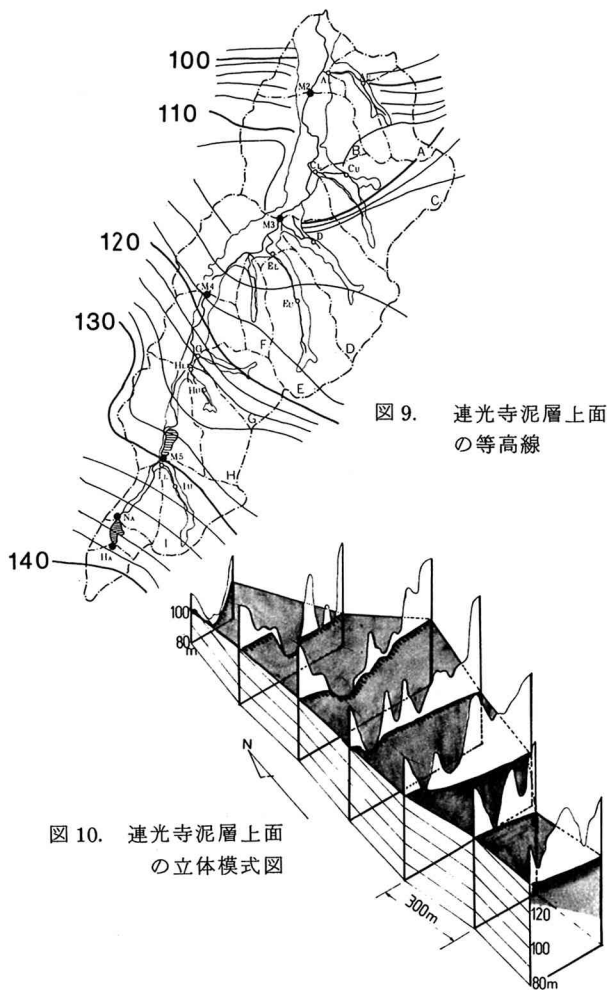


図 8. 別所流域の地質断面



2.4 まとめ

第三系から第四系にかけての丘陵を流域とする河川の地下水流出高の大小は、地下構造とよく対応している。固結度が比較的高い地層と未固結層の場合には、後者において地下水流出は豊富である。固結度が低い場合には、砂、礫、泥などの堆積素材とその層序ならびに傾斜などの地下構造に対する河道の位置関係と密接な関連をもち、河道が不透水性のシルト、泥層上の地下水流出を受ける形の場合に地下水流出高は大きく、そうでない場合にその値は小さい。

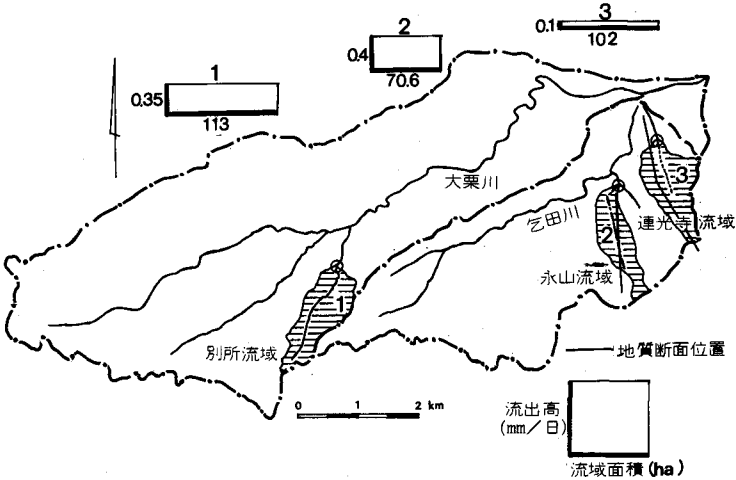


図 12. 多摩ニュータウンの開発域および自然域における冬季流量測定結果

3. 既開発地の地下水流出

上述のような地下水流出特性をもつ丘陵地が、切土・盛土などの造成そして市街化した場合の地下水流出機構の変化について、多摩ニュータウン区域内の既開発地区の調査に基づいて考察する。

3.1 現地調査によって得られる知見

多摩ニュータウン内の既開発地区を踏査し、地下水流出現象と関連が深いと思われる事項を次に列記する。

- i) 多摩ニュータウンの排水は分流方式であるが、雨水排水管によっては、無降雨日が続いた後にも自然流域に匹敵するほどの流量が流れているものが見られる。
- ii) これらの流水は、水質（色、臭い、水温、電気伝導度など）から判断して、大部分が地下水流出と考えられる。
- iii) 造成にともなう切法面では、泥層（現場では土丹と呼ぶ）上の砂層から湧水や浸出水の絶えない所があり、こうした水が側溝などを通して雨水管に流入している。また、場所によっては雨水管の目地からかなりの量の地下水流入があると言われる。
- iv) 地下水位が高い強湿地性の谷地に盛土する場合、泥土をサンド・マットで置換し暗渠排水するという工法が採られる。このような排水管の末端では、敷設後数～十年を経過したものでも流水が絶えない。

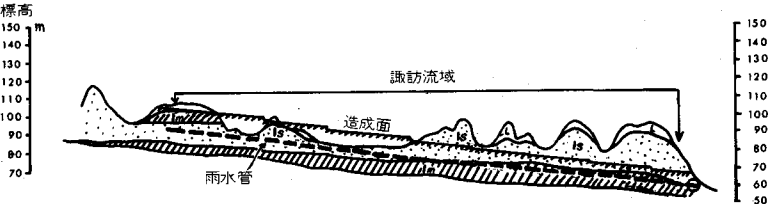


図 13. 開発域諏訪流域の地下構造と雨水排水管の位置

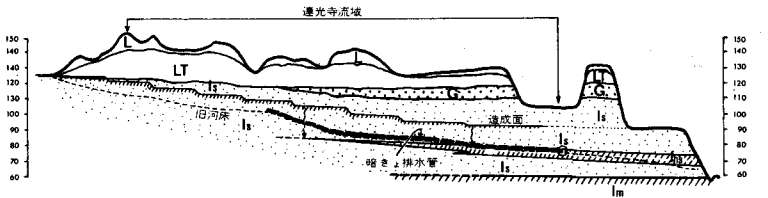


図 14. 開発中の連光寺流域の地下構造と排水管の位置

以上の事実は、条件によっては造成後も地下水流出が保存される場合があることを示している。

3.2 自然流域と既開発地域の地下水流出の対比

住宅団地となって10数年経た諫訪流域(70.6 ha)および造成中の連光寺流域(102 ha)において、1978年9月から79年3月にかけて1週間ごとの流量観測を行った。観測期間中で最小流量を示す1979年1月21日の両流域の流出高を同日の自然地区別所流域の流出高とともに図12に示す。既開発の諫訪流域で自然丘陵地別所流域を上まわる流出高である点が注目される。

図13には、諫訪流域の地質縦断と雨水排水幹線の位置が示されている。雨水排水幹線は一般に旧谷地部に敷設され、この流域の場合は不透水層をなす稻城泥層(I_m)の地下水流出を集水する形となっている。この泥層上部の地下水流域界は、別所流域におけるグループⅢと同様に地表流域界を越えて南部に拡っており、その地域はニュータウン区域外で改変は受けていない。すなわち、地表付近が改変され不透透域が増加しても、地下水流域は地表流域よりかなり規模が大きく、雨水管がそれからの流出を受けるためにこの流域の地下水流出高は自然流域と大差がないものと推定される。

連光寺流域の流量は、サンドマット中の暗渠排水系の末端で観測され、地表排水は別に導かれているので、地下水流出成分のみと考えられる。観測期間を通じて最小流量と最大流量の比が1.5程度で、流出量はほとんど変化しない。図14の地質縦断図を見ると、下流部に難透水性の稻城層に属する硬砂(I_{hs})が分布するほかは、中・上流部では稻城砂層が厚く堆積している。排水管はI_{hs}上の地下水を受けるに過ぎず、これがこの流域の流出高が0.1 mm/日と小さい理由と考えられる。

すなわち、開発域においても、地下水流出は、流域の地下構造およびそれと雨水排水系の位置関係に対応していることがわかる。

4. むすび

第三紀鮮新世～第四紀丘陵は一般に、本稿で対象とした事例のように、透水層と難透水層が比較的規則的な互層をなすから、ここで得られた知見は他の丘陵地にも定性的に適用できると考えられる。

山地流域との大きな相違は、地表流域界と地下水流域界が大巾に異なる場合がある点である。丘陵地河川は一般に小規模河川が多いから、とくにこの効果は無視できないと思われる。水循環過程のモデル化においても物理性に重点を置くならこの効果を取り入れるべきだと考え、現在そうした検討を進めている。

謝辞 流量観測などに当っては、その時点時点で本学学生、大学院生等の援助を得た。また、多摩ニュータウンの調査に当っては、日本住宅公団南多摩開発局の各位に多大な協力をいただいた。記して謝意を表する。

参考資料および文献

- 1) 日本住宅公団開発地区位置図, 1978. 3
- 2) 千葉県南総地区土質簡易調査, 応用地質調査事務所, 1973. 3
- 3) 南多摩地区土質調査, 日本住宅公団, 日本工営, 1966
- 4) 虫明功臣, 村上雅洋, 小池雅洋: 河川の低水時流量の地域的偏在とその要因 — 台地・丘陵河川の場合, 生産研究, 30-5, 1978. 3
- 5) 虫明功臣, 安藤義久, 高橋裕, 松下潤: 環境用水としての地下水流出の分布特性と都市化による変化, 第7回環境問題シンポジウム講演論文集, 土木学会, 1979. 8