



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	母子里試験地の山腹斜面における地中水の挙動 I : テンシオメータ群による圧力水頭の観測
Author(s)	石井, 吉之; ISHII, Yoshiyuki; 小林, 大二 他
Citation	低温科学. 物理篇, 53, 23-34
Issue Date	1995-02-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18635
Type	departmental bulletin paper
File Information	53_p23-34.pdf



母子里試験地の山腹斜面における地中水の挙動 I * —— テンシオメータ群による圧力水頭の観測 ——

石井 吉之・小林 大二

(低温科学研究所)

(平成6年11月受理)

Abstract : The movement of subsurface water during rainstorms and snowmelt was studied on a forested hillslope in the Moshiri experimental basin in northern Hokkaido. The whole soil mantle on the slope was almost saturated during the events, because the effective porosity of the soil was small and the water content was high even in non-event periods. The isopleths of the total head of soil water were horizontal and the total head gradient was large, when the infiltration from the ground surface did not occur. In contrast, the unsaturated area near the ground surface spread at the times of active infiltration. These results suggest that the hydraulic contacts of soil water do not exist. So, the potential flow of subsurface water in the whole soil mantle cannot be supported. Although the responses of the pressure head to snowmelt started from the shallower zone, the diurnal range of the pressure head was larger in the deeper zone. Specifically, it was the largest at a depth of 2 meters and the pressure head was positive. These facts indicate that active movement of subsurface water occurs in zones deeper than 2 meters.

要旨 : 北海道北部の母子里試験地の山腹斜面において、テンシオメータ群による圧力水頭の通年観測を行ない、降雨や融雪にともなう地中水挙動の実態を調べた。観測斜面の表層土壌は細粒子に富むため、含水率は高いが有効空隙率は小さく、大雨時や融雪期には土壌全層が飽和に近い状態になる。土壌層内の全水頭等値線は地表からの水供給が無い時に水平となり、間隔も密である。また、供給最盛期には地表付近で不飽和領域が拡大する。これらの結果は、地中水の水理的連続性が絶たれていることを示唆し、地中水の全層にわたるポテンシャル流動は考え難い。融雪期には、融雪水の浸透にともない浅い層から圧力水頭の応答が始まる。しかし、その変化幅は最下層の200 cm 深で最も大きく、しかも正圧の変動を示すことから、降雨や融雪に伴う活発な地中水の流動は2 m 以深の土壌層内で起きていると推察される。

Key words : forested hillslope, isopleth of total head, pressure head, subsurface water, tensiometer nest

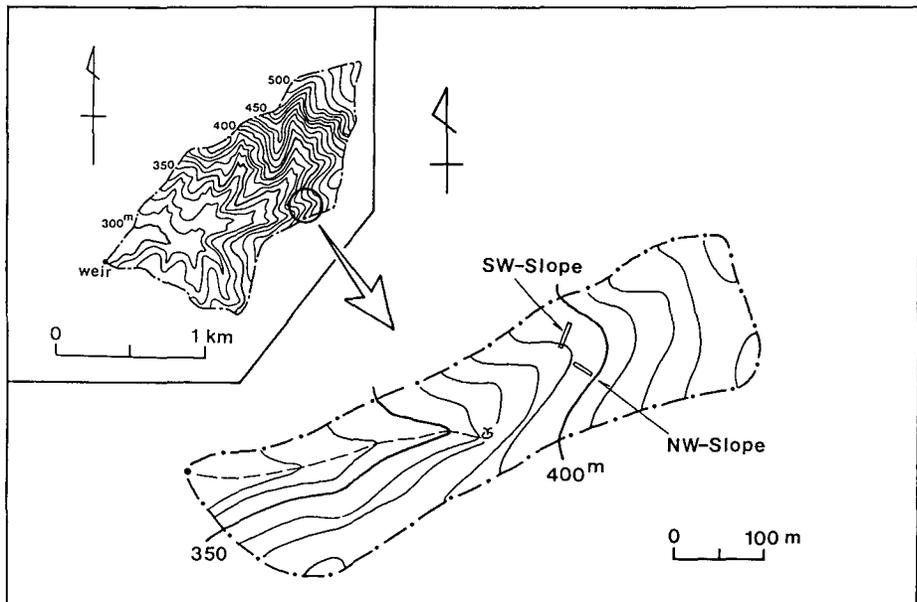
* 北海道大学低温科学研究所業績 第3756号

キーワード：圧力水頭，全水頭等値線，地中水，テンシオメータ群，林地山腹斜面

I. まえがき

森林流域の山腹斜面における地中水の挙動は、洪水流の形成や斜面での土砂輸送、栄養塩等の物質循環などと深く関わっている。このため各地で降雨や融雪にともなう地中水応答の実態観測がなされてきた。これまでに、1) 基岩より上部の表層土壌内には透水性の秀でた preferential pathway が存在する¹⁻⁴⁾、2) 地中水の流れは全水頭勾配に従うポテンシャル流で表される^{5,6)}、3) pre-event water が event water に押し出される^{7,8)}、などの多様な観測結果が報告されているが、いずれにしても洪水流の形成に寄与する地中水流動の大部分は、その地域の地形・地質・気候・植生を反映した表層土壌内で起きている。中緯度湿潤地域の森林山腹斜面における降雨流出過程の研究結果については田中⁹⁾がとりまとめている。

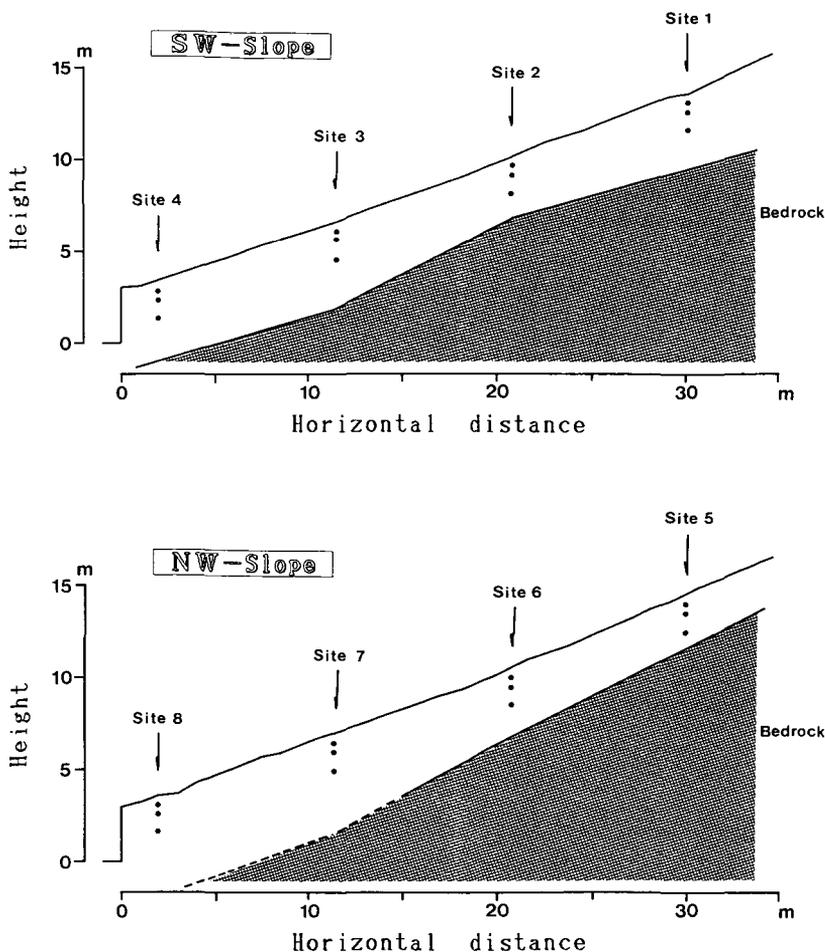
北海道北部の北海道大学雨竜演習林内の母子里試験地(流域面積 1.3 km²)では、川水の水温及び電気伝導度を指標とした流出成分分離の結果から、融雪出水時の早い流出応答(quick flow)の70~80%が地中流出成分によると推察されている^{10,11)}。しかし、地中水の挙動の実態についてはほとんど調べられていない。そこで、実態をとらえる一手段として、この流域内の山腹斜面にテンシオメータ群を埋設し圧力水頭の通年観測を行なった。テンシオメータには脱気水を用いるため一般に冬期間の観測が困難であるが、受感部全体を地中に埋設することにより積雪条件下での観測も行なった¹²⁾。この論文では1991年11月から1992年10月までの1年間の観測で得られた結果を報告する。



第1図 観測斜面の位置図

II. 観測方法

母子里試験地は石狩川支流雨竜川の源頭部(北緯 44°22', 東経 142°17')に位置する。1971~80年の10ヶ年間の年平均気温, 年降水量, 最深積雪はそれぞれ 3.5°C, 1375 mm, 262 cm であり¹³⁾, 冬期の多雪寒冷な気候がこの地域の特徴である。試験地の標高は 290~545 m, 流域平均勾配は約 17° で, 観測は試験地中腹の1次河道に面した南西及び北西向ききの2斜面(標高約 400 m)で行なった(第1図)。分水界までの斜面水平長は南西斜面が 70 m, 北西斜面が 110 m で, 平均勾配はどちらも約 20° である。斜面周辺の植生はエゾマツ, トドマツ, ミズナラ, ダケカンバ, イタヤなどの針広混交林からなる疎林で, 林床には高さ 1 m ほどのチシマザサが密生している。斜面の表層土壌層は凝灰岩質集塊岩の基岩¹⁴⁾ 上に厚さ 3~6 m で分布し, 地表面下 10~20 cm まではササの根がはびこった腐植土層, それ以深はシルト分に富む風化土壌層である。風化土壌層は深くなるほど角礫を多く含むようになり, 直径 30 cm 程度のものも存在する。



第2図 斜面の縦断形状とテンシオメータの埋設地点

どちらの斜面でも、1次河道沿いの林道に面した斜面末端から上方へ30 mまでの区間を観測対象とし、10 m間隔に4ヶ所のテンシオメータ埋設地点を設けた(第2図)。各地点では腐植層を20 cm掘り下げ、ポーラスカップの深度が地表面から50 cm, 100 cm, 200 cmとなるように各々3本のテンシオメータを埋設した。また、簡易貫入試験を行ないNc値が50~60以上となる深さを基岩との境界とした。テンシオメータには自記測定が可能なコーナシステム(株)のKDC-S5(圧力センサー式)を用い、測定値は30分間隔でデータロガー(KADEC-UV)に取り込んだ。テンシオメータ本体への脱気水補給は6ヶ月に1度の割合で行なった。圧力センサーは負圧用のものであるが、+100 cmH₂Oまでの正圧も測れることを実験室で確かめた。

地中からの流出水を観測する目的で、両斜面の末端に深さ3 mのトレンチを作成した。しかし、壁面崩壊の防止策を特には施さなかったため、冬の間に霜柱の成長などによって壁面が脆弱になり、翌春までには両斜面とも壁面が崩壊し観測はできなかった。崩壊した南西斜面の壁面を一部削割した上で、地表からの深さ70 cm及び170 cmの2ヶ所から土壌試料(100 cm³)を採取し物理試験を行なった。

III. 観測結果

1. 表層土壌の物理特性

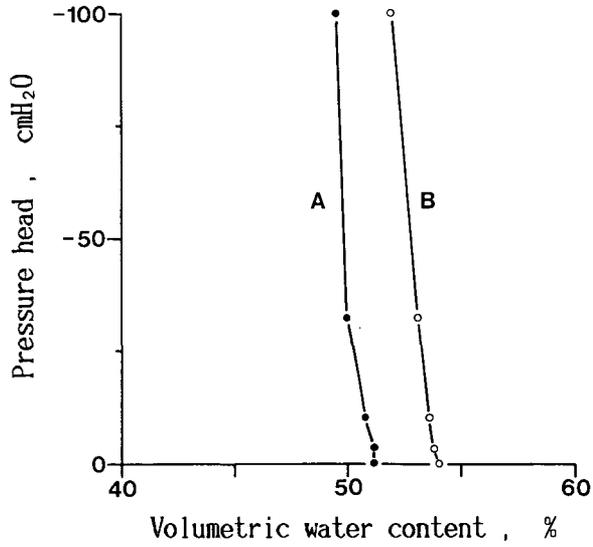
採取した試料の物理試験値を第1表に示す。土粒子全重量の70%までを粘土・シルトなどの細粒子が占め、空隙率は50~60%と大きい。しかし、第3図に示す排水過程の水分特性曲線を見ると、圧力水頭の変化に伴う体積含水率の変化が非常に小さく、有効空隙率はきわめて小さいとみなされる。また、飽和透水係数も 5×10^{-6} cm/s程度の著しく小さな値が得られた。100 cm³の採土管で数cm以上の礫をさけるように採取した試料の試験結果であるため、実際の表層土壌の物理特性とのくい違いも考えられる。

第1表 表層土壌の物理特性と飽和透水係数

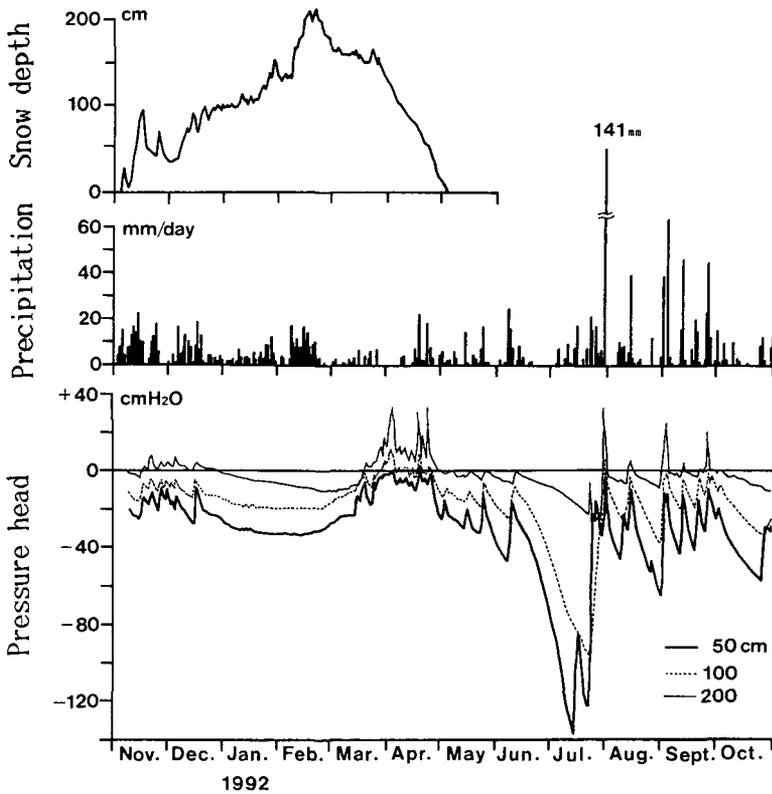
採取深度 cm	真比重	三 相 比 %			空 隙 率 %	湿潤密度 g/cm ³	乾燥密度 g/cm ³	飽和透水係数 cm/s
		固相率	液相率	気相率				
70	2.732	48.0	35.0	17.0	52.0	1.661	1.311	6.48×10^{-6}
170	2.753	42.1	37.8	20.1	57.9	1.535	1.157	3.72×10^{-6}

2. 圧力水頭の季節変化

対象期間中のSite 1における圧力水頭の日平均値を、日降水量、積雪深とともに第4図に示す。概して上の層ほど圧力水頭が小さく、下層の200 cm深は年間を通じ飽和ないし飽和に近い状態にある。11~12月には50 cmの積雪があったが、気温がプラスの場合には降雨や融雪に伴う圧力水頭の変動が現れている。本州日本海側のざらめ雪地帯と同様の状況である¹²⁾。1~3月の厳寒期には、量は少ないが安定した地温融雪水の供給があり¹³⁾、ほぼ一定の圧力水頭に保たれる。3月下旬の融雪期の始まりとともに土壌全層が飽和に近い状態となり、5月上旬の消雪ま



第3図 表層土壌の排水過程における水分特性曲線 (A: 70 cm 深, B: 170 cm 深)

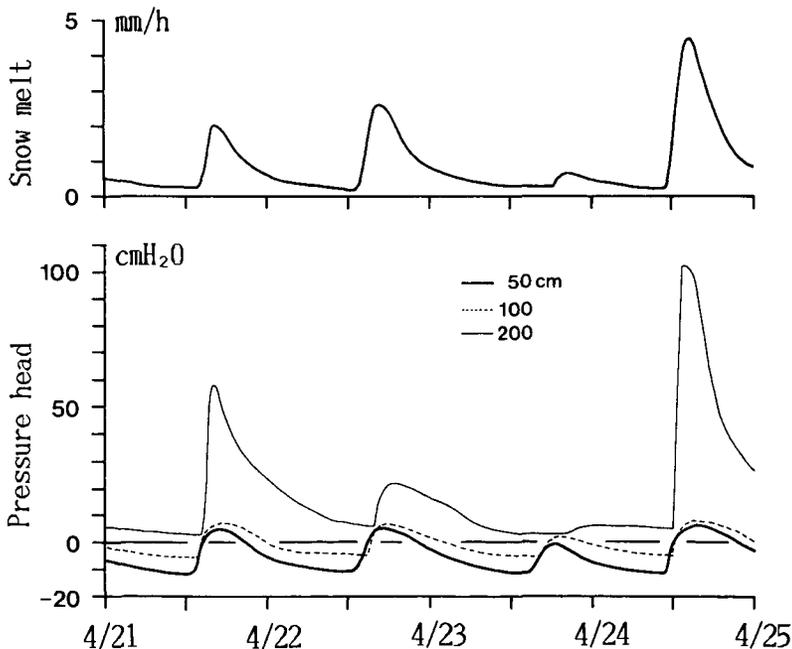


第4図 Site 1における積雪深, 日降水量, 深さ別圧力水頭の季節変化

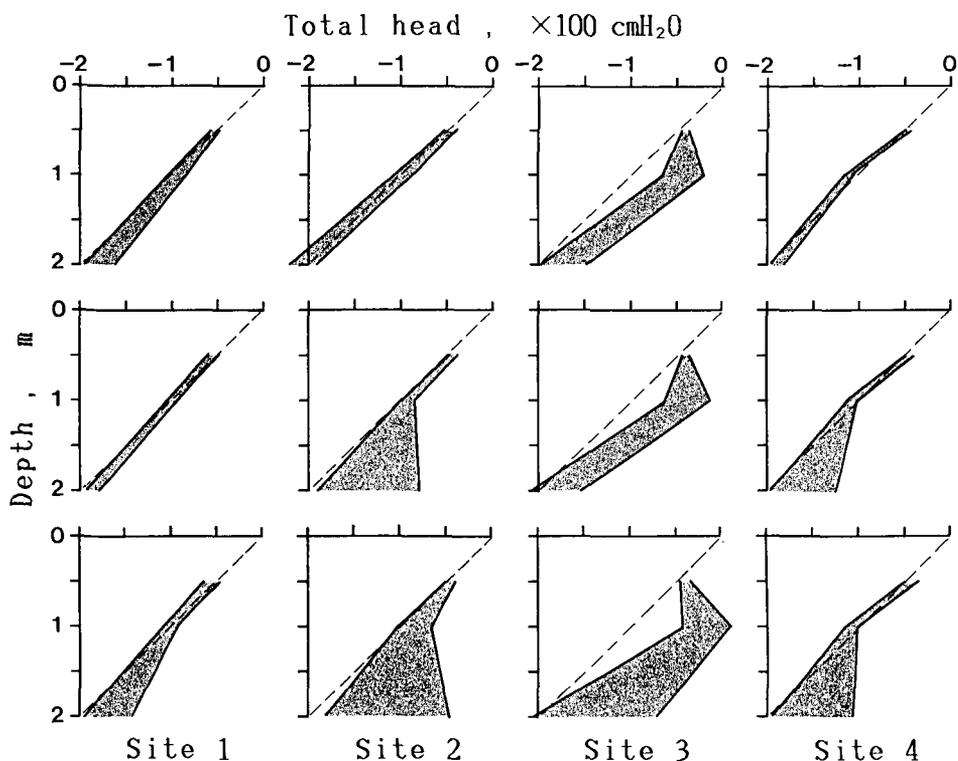
で1ヶ月以上もこの状態が維持される。消雪後の圧力水頭は、降雨によって一時的に増加することはあっても概ね減少傾向を示し、表層土壌は乾燥化へ向かう。6月下旬から7月にかけては1年を通じて最も圧力水頭が小さくなる。斜面の表層土壌は著しく乾燥し、河川流量が最渇水となる時期である¹⁶⁾。7月下旬の大雨により圧力水頭は急激に増加し、土壌が湿潤化した。しかし、その後も無降雨日が続くと圧力水頭は急速に減少する。9月になり降雨日が多くなると日ごとの水頭変化も著しくなる。10月は降水量が少なかったため、下旬には融雪期後（5月末～6月）の圧力水頭と同程度まで減少した。

3. 降雨や融雪に伴う圧力水頭の時間変化

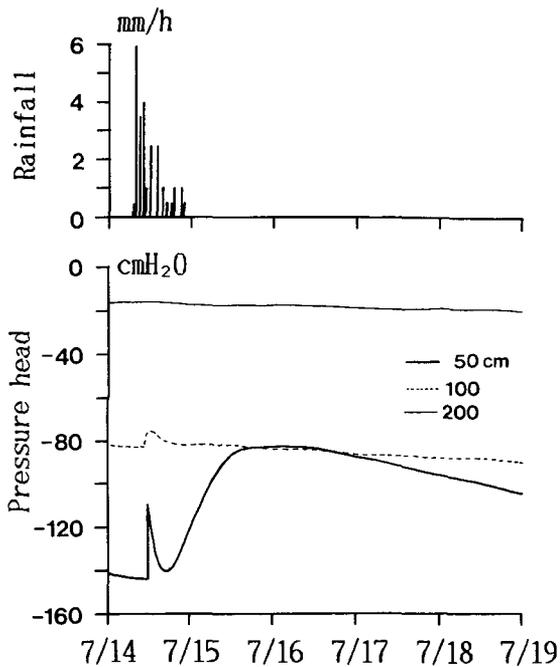
融雪後期の4月21日0時から25日0時までの融雪水量（標高290 mの平地で観測された積雪下面流出量）、Site 1における深さ別の圧力水頭の時間変化を第5図に示す。融雪水が地表へ活発に供給され始めるとともに浅層の50 cm 深から順に圧力水頭が増加しはじめ、融雪水が鉛直方向に浸透するようすが現れている。融雪水量の供給が少ない24日は、上層から下層への変化の遅れ時間が大きく浸透速度が遅い。不飽和土壌層内では、深くなるにつれて圧力水頭の変動幅が小さくなり、地表面での変動が遅れを伴って平滑化されていくのが一般的である¹⁷⁾。しかし、この斜面では200 cm 深はすでに飽和状態にあり、50 cm 深や100 cm 深に比べ大きな正圧の変動を示している。融雪期間中の南西斜面における全水頭の日変動幅を第6図に示す。上段が4月1日、中段が4月11日、下段が4月21日の変化で積雪深はそれぞれ143 cm, 93 cm, 65 cmであった。各地点とも全水頭の変動は下層ほど大きく、斜面全体に共通する特徴である。各深さでの変動幅は融雪期の進行とともに大きくなり、その傾向は下層で最も顕著に現れてい



第5図 Site 1における融雪後期の融雪水量と深さ別圧力水頭の時間変化



第6図 南西斜面における全水頭の日変動幅 (上段：4月1日，中段：4月11日，下段：4月21日)



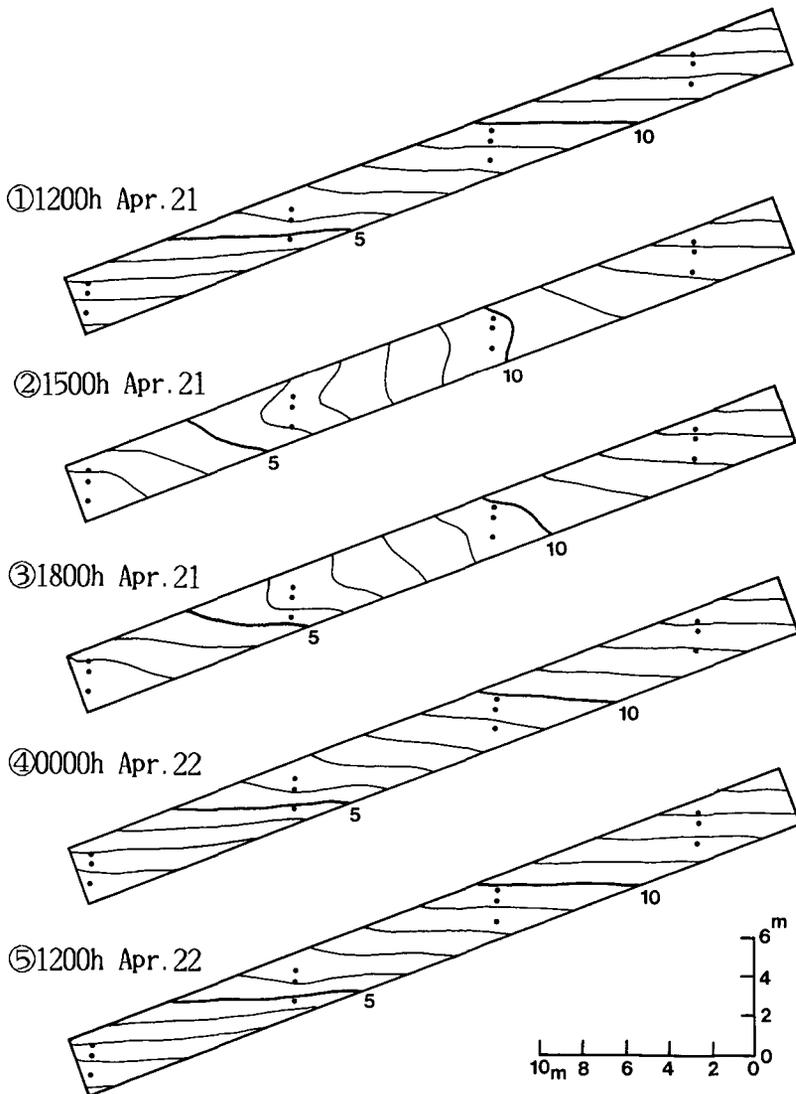
第7図 Site 1 における夏期渇水期の降水量と深さ別圧力水頭の時間変化

る。北西斜面では Site 5 から Site 7 までのいずれも 200 cm 深のテンシオメータに機器不良やポーラスカップの接地不良に起因する異常値が現れ、適正な観測値が得られなかった。しかし、Site 8 では南西斜面と同様の特徴が認められた。

夏の渇水期における降雨時の圧力水頭の応答を第 7 図に示す。降雨強度が大きい時間帯に、封入空気の影響と考えられる素早い応答が 50 cm 深と 100 cm 深に現れている。雨水の浸透に伴う応答はこれより大きく遅れ、50 cm 深だけに緩慢な変化が現れている。しかし、100 cm 深と 200 cm 深には変化が見られず、融雪期の変動とは著しく異なっている。

4. 融雪期の斜面土壌層内の全水頭分布

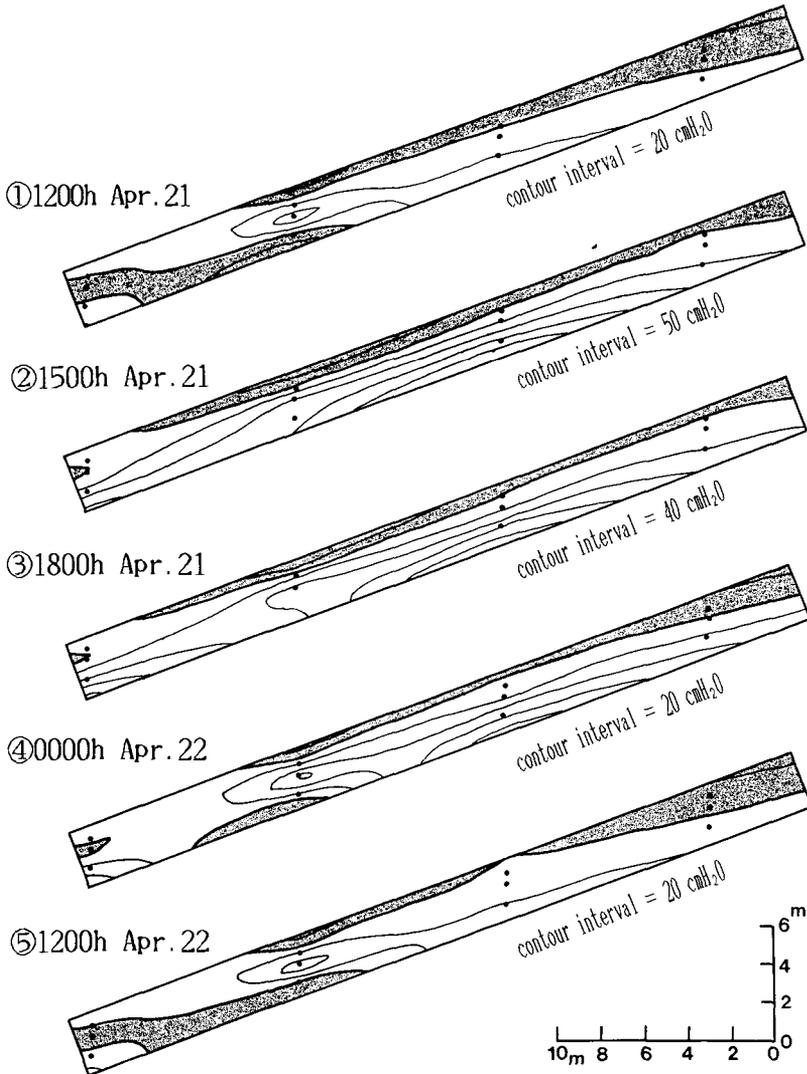
斜面末端の切土底面を位置水頭の基準とした場合の、南西斜面における土壌層内の全水頭等



第 8 図 南西斜面における全水頭等値線図の時間変化 (等値線間隔 1 m)

値線を第8図に示す。図では土壌層の2次元鉛直断面を模式的に長さ35m厚さ3mの長方形で表している。融雪水の地表面への活発な供給は15時から18時にかけて起きるが、それ以前の12時には等値線はほぼ水平である。融雪水の供給により200cm深の圧力水頭が顕著に増大するため、等値線は鉛直方向に傾き、斜面長方向の流れが優勢となる。供給が無くなった深夜0時には、ほとんど元の水平な等値線に戻っている。一方、圧力水頭の等値線を第9図に示すが、融雪水が供給されているにもかかわらず、地表面付近は不飽和状態（図の網掛け部分）が維持され、しかも供給の最盛期（15～18時）に不飽和領域が拡大する傾向にある。北西斜面では前述したように200cm深の観測値を欠くため、南西斜面ほど詳しくは確かめられないが、地表付近やSite 8付近では南西斜面とほぼ同様の結果が得られた。

なお、上記の等値線図は塩野ら¹⁸⁾の市販プログラムを用いて作成した。



第9図 南西斜面における圧力水頭等値線図の時間変化（網掛け部分が不飽和領域を示す）

IV. 考 察

1. 地中水のポテンシャル流動

森林斜面でのテンシオメータを用いた圧力水頭の観測は、これまでも多くの試験地で実施されてきた。地中水の流動を飽和不飽和領域にまたがるポテンシャル流とみなし、表層土壌内の全水頭等値線図が作成されたり、これから計算される地中水の流動量が評価されたりしている^{6,19)}。しかしながら、母子里試験地の観測斜面で同様の全水頭等値線図を作成したところ、地表からの水供給が無い時に等値線が水平で鉛直浸透が卓越し、供給最盛期に斜面長方向の流動が起こる結果となった。等値線間隔も無供給時の方が密で、最盛期にはむしろ間隔が広がる。しかも、地表面付近の不飽和領域は供給最盛期に拡大する傾向にある。こうした観測結果が得られた理由は次のように考えられる。この斜面の風化土壌層は有効空隙率がきわめて小さいので、液相率が高くても多くは吸着水であり、自由水の割合は非常に少ない。そのため、土粒子間の自由水どうしのつながり（水理的連続性）が絶たれていることが十分に考えられる。この場合、全水頭勾配を考えても意味は無く、いくら勾配が大きくても地中水は流動しない。また、融雪水の供給最盛期には下層から圧力水頭が増加するため、下層ほど自由水どうしの連続が起きやすい。水理的に連続した自由水は鉛直下向きあるいは斜面長方向に流動し、その分だけ地表面付近の不飽和領域が拡大する。

母子里試験地の斜面表層土壌のように、細かい土粒子が卓越し第3図のような水分特性をもつ土壌層内では、自由水の水理的連続性が絶たれている場合も多く、層全体にわたっての地中水のポテンシャル流動は考え難い。

2. quick flow となる地中流出成分の生起場

母子里試験地における山腹斜面の土壌層は、細粒なために常時含水率が高い状態にある。しかし、少なくとも深さ2mまでの表層土壌内では、自由水の割合が少ないために降雨や融雪水の浸透に伴って重力排水される水量も少なく、活発な地中水流動の場にはなっていない。

斜面末端の崩壊した切土面では複数のごく小さなパイプ流が観測されたが、同じパイプ孔からの流出は数日で止み、流出孔の位置が一定していない。パイプ孔の数も流出量も少ないことから、2m深までのパイプ流がquick flowに寄与するとは考え難い。また、切土面を作ること自体が自然の地中水流動を妨げている可能性もあるが、ここの観測斜面では200cm深の圧力水頭の応答が顕著であった事実が重要であり、2mより深い場所で活発な地中水流動が起きていると考えられる。今後は2m以深での地下水水位応答や土壌の諸特性を明らかにし、その上でquick flowとなる地中流出成分の生起場を考えていく必要がある。

V. ま と め

北海道北部の母子里試験地の山腹斜面において、降雨や融雪に伴う地中水挙動の実態を把握するため、テンシオメータ群による圧力水頭の通年観測を行ない以下の結果が得られた。

1) 表層土壌は粘土やシルトなどの細粒子に富むため、含水率は高いが有効空隙率は小さい。融雪期には全層飽和に近い状態が1ヶ月以上も継続する。

2) 地表面からの融雪水の浸透にともない浅い層から圧力水頭の応答が始まる。しかし、変化幅は最下層の200 cm 深で最も大きく、しかも正圧の変動を示す。この特徴は斜面上の全地点に共通する。

3) 表層土壌層内の全水頭等値線は、地表からの水供給が無い時に水平で鉛直浸透が卓越し、等値線間隔も密になる。また、地表面付近の不飽和領域は供給最盛期に拡大する。これらの結果は土粒子間の自由水の水理的連続性が絶たれていることを示唆し、表層土壌全層にわたる地中水のポテンシャル流動は考え難い。

4) 少なくとも深さ2 mまでの表層土壌内では、自由水の割合が少ないために降雨や融雪水の浸透に伴って重力排水される水量も少なく、活発な地中水流動の場にはなっていない。

この研究は北海道大学雨竜地方演習林において行なわれた。当時の松田彊林長、松本吉夫技官をはじめとする演習林教職員の諸氏には様々な便宜をはかって頂いた。当研究所の石川信敬助教授と兒玉裕二助手からは有益な助言を、また、北大大学院生の野村睦、中林宏典、新見和造の諸氏からは現地観測に協力をして頂いた。記して感謝致します。この研究の一部は文部省特定研究経費（代表・小林大二）および文部省科学研究費（課題番号 03455001, 代表・石川信敬）によった。

文 献

- 1) 石井吉之 1990 林地山腹斜面における subsurface flow の河道集中特性. 北海道大学地球物理学研究報告, **53**, 1-24.
- 2) 王棟・窪田順平・塚本良則 1993 山腹斜面土層の飽和面形成における縦パイプの役割. 日本林学会誌, **75**, 88-99.
- 3) 新藤静夫・丹下勲・寺島治男 1988 斜面末端部における地中水の挙動. 波丘地研究, **6**, 124-145.
- 4) Beven, K. and Germann, P. 1982 Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.*, **18**, 1311-1325.
- 5) 太田猛彦・塚本良則・城戸毅 1985 丘陵性自然斜面における雨水移動の実証的研究(II). 斜面内地中流の実態. 日本林学会誌, **67**, 383-390.
- 6) 窪田順平・鈴木雅一 1988 山腹斜面における2次元土壌水分ポテンシャル分布とフラックスの実態. ハイドロロジー(日本水文科学会誌), **18**, 62-73.
- 7) 鈴木啓助・小林大二 1987 森林小流域における融雪流出の形成機構. 地理学評論, **60**, 707-724.
- 8) Pearce, A.J., Stewart, M.K. and Sklash, M.G. 1986 Storm runoff generation in humid headwater catchments. 1. Where does the water come from? *Water Resour. Res.*, **22**, 1263-1272.
- 9) 田中正 1989 流出. 気象研究ノート, **167**, 67-89.
- 10) Kobayashi, D. 1985 Separation of the snowmelt hydrograph by stream temperatures. *Jour. Hydrology*, **76**, 155-162.
- 11) Kobayashi, D. 1986 Separation of a snowmelt hydrograph by stream conductance. *Jour. Hydrology*, **84**, 157-165.
- 12) 鈴木啓助・斎藤和興 1990 積雪下での土壌水分の自動測定法. 平成2年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 108.
- 13) 北海道大学雨竜地方演習林 1990 雨竜地方演習林の気象報告. 母子里観測所(1956~1989). 演習林業務資料, **22**, 43-88.

- 14) 今西茂 1956 五万分の一地質図幅説明書「名寄」. 北海道立地下資源調査所, 45 pp.
- 15) Motoyama, H., Kobayashi, D. and Kojima, K. 1986 Effect of melting at the snow-ground interface on the runoff during winter. *Japanese Jour. Limnology*, **47**, 165-176.
- 16) Kobayashi, D., Suzuki, K. and Nomura, M. 1990 Diurnal fluctuation in stream flow and in specific electric conductance during drought periods. *Jour. Hydrology*, **115**, 105-114.
- 17) 八幡敏雄・田淵俊雄・中野政詩 1967 土壤物理実験. 東京大学出版会, 123 pp.
- 18) 塩野清治・弘原海清・升本真二 1988 BASICによるコンターマップII (応用編). 共立出版, 171 pp.
- 19) 辻村真貴 1993 厚い土層からなる急峻な森林斜面における土壤水の挙動について. *水文学会誌* (日本水文学会誌), **23**, 3-18.