

II-87 半導体圧力センサーを用いた不飽和多孔体の圧力水頭および空気圧の測定

国立公害研究所 正員 平田 健正
 大阪大学工学部 正員 村岡 浩爾
 中国・中山大学 唐 常源

1. 研究目的：降雨に対する速い流出応答が注目されている。新藤(1983)は山地小流域での観測から、降雨流出過程で地下水位や流出水量に2つのピークが現れること、第1のピークはマトリクス流、第2のピークはパイプ流に起因することを報告している。また毛管水縁に少量の水を散水するだけで、その100倍もの地下水位の上昇のあることも知られている。(Gillham, 1984)

こうした要因として、大間隙を降下する重力流、ピストン流や封入空気圧などが指摘されているが、極めて速い降雨流出には降雨に対する毛管水縁の応答が深く係わっているとみられる。従来、不飽和帯の水移動について、その簡便さから水あるいは水銀マノメータを連結したテンシオメータが多用されてきた。ただこのタイプのテンシオメータは、圧力水頭変化を検出するのにかなりの時間を要し、非定常性の強い現象に正確には追従できないおそれがある。そこで応答性を改善するため、半導体圧力センサーを用いた測定機器を開発した。この機器の特性と室内実験で得られた降雨浸透過程の圧力水頭および通気帯空気圧の変化について、結果の一部を報告する。

2. テンシオメータとエアーセンサー

2.1 機器の構造：通常のテンシオメータでは、土壤中に埋設したポーラスカップを介して土壤の水分張力（あるいは正圧）を水または水銀マノメータに伝へ、マノメータ内の水位変化を土壤の圧力水頭変化として検出する。ところがマノメータ内の水位変動と同量の水がポーラスカップを通して土壤との間で授受されるため、これに相当の時間が費やされ、検出に時間遅れが生じる。そこで受感部にシリコン結晶ウエハをダイヤモンドとした半導体圧力センサーを使用し、応答性を改善した。図1に示すように、テンシオメータは圧力センサー(5)、水タンク(1)とポーラスカップ(3、内径14mm、外径18mm、長さ56mm)から構成されている。

2.2 応答性：圧力センサー自体の応答時間は1.5m・secと極めてよく、検出精度は1g(1cm H₂O)である。半導体は温度変動に敏感であるが、温度補償回路を組み、誤差を2g/10°Cに押さえている。また±1kg(10m H₂O)の範囲を測定することができ、その間で圧力と出力に線形関係がある。圧力センサーとポーラスカップを結び、その間を水で満たせばテンシオメータとして、また土壤と圧力センサーを適当なチューブで連結すれば通気帯の空気圧を測定するエアーセンサーとして使用できる。

最初にテンシオメータのポーラスカップとエアーセンサーに空気圧(16.7g/cm²)をかけたところエアーセンサーはほぼ瞬時に、テンシオメータも60秒で応答した。図2は後述する川砂(体積含水率28.5%)を詰めた容器内にテンシオメータとエアーセンサーの検出部を装填し、20.8g/cm²の空気圧を与えてチェックした結果である。土壤中での空気圧伝播に時間がかかるため、このケースで

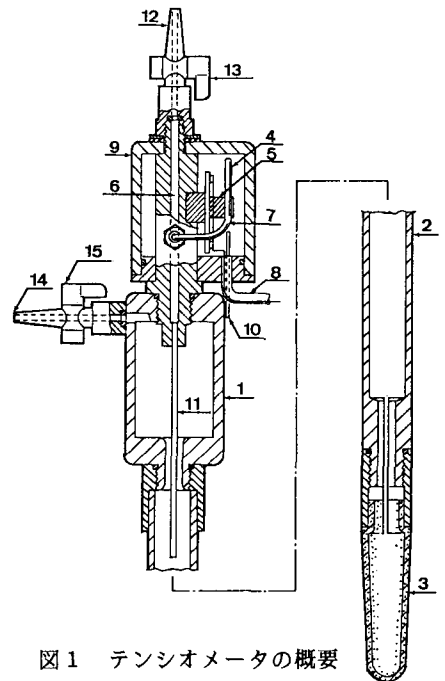


図1 テンシオメータの概要

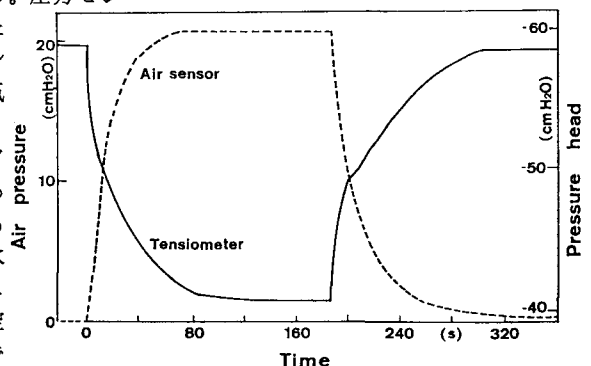


図2 土壤中の空気圧に対する応答性

はエアースセンサーもフルスケール応答するのに約70秒要している。テンシオメータについては空気圧の増加に伴って土壌の圧力水頭が増加し、120秒後に定常に達している。

3. 降雨浸透実験と結果：実験は内径19cm、深さ120cmの亚克力樹脂製円筒カラムに平均粒径0.083mm、均等係数1.12の川砂を水締めし、人工降雨を与えた。テンシオメータ（T）とエアースセンサー（A）を一組にし、底面から15.5、45.5、75.5、105.5cmの4地点に設置した。地下水面は底面から9.5cmに設定し、またカラム底に接続したパイプから排水量を測定した。降雨強度は湛水状態の174.6mm/hr、非湛水状態の80.4、50.3、35.0mm/hrの4ケースである。

図3は一連の実験終了後に得られた体積含水率の鉛直分布および測定機器と地下水面の位置関係を示している。T1とA1は不飽和毛管帯の上端に、T3とA3は下端に、T4とA4は飽和毛管帯に位置している。

図4は80.4mm/hrの降雨を1時間与えた時の結果であり、実験は非湛水状態にある。総降雨量は2084ml、総排水量は2280ml、データは20秒間隔でメモリーバックに記録し、パソコンで読み取って解析した。また著者らの開発したテンシオメータは図2から判るように土壌の圧力水頭と空気圧の両方を検出するため、ここではテンシオメータの測定値をTとし、Tから空気圧を差し引いた値を圧力水頭P（ $P = T - A$ ）として描いている。

水頭Tの変化し始める時刻はT1から順に、降雨開始後16、33、35、26分、空気圧AについてはA1から順に38、30、30、26分である。また降雨開始後30分で排水が始まる。その後排水量は空気圧と同期するように増加し、空気圧の最大となる時刻（60分）に排水量も最大値を取り、最初のピークを形成する。降雨終了後には空気圧も減少し、それに伴って排水量も低下する。そして降雨開始後72分から再度排水量は増加し始め、125分に第2のピークを作る。特に注目すべきは、排水開始から第1のピーク時までの時間帯である。そこでは全ての水頭Tが増加する一方、空気圧を差し引いた圧力水頭P（ $P = T - A$ ）については、P2とP3で減少し、排水過程に入っていることを示している。降雨による実質水分はまだP2とP3の観測地点には到達していないことから、第1のピークは不飽和帯に封入された空気が圧縮され、地下水を押し出すように排水を促していると推察される。また第2のピークは降水の浸透による排水と考えられる。この結果は、新藤の言う降雨時に観測された地下水位や流出量の2つのピークについて、封入空気圧が強く関与していることを示唆する。

湛水条件で行った降雨強度174.6mm/hrでは、さらに顕著な空気圧のパターンと排水量に2つのピークが確認された。ところが、降雨強度50.3と35.0mm/hrでは空気圧はほとんど観測されず、排水開始の時刻も遅れ、排水量には1つのピークしか見られなかった。

参考文献

Gillham, R.W.(1984): The capillary fringe and its effect on water-table response. J.Hydrol., 67, 307-324.

新藤静夫(1983): 谷頭部斜面に発生する崩壊と地中水の挙動。昭和57年度文部省科研・自然災害特別研究報告, 80P.

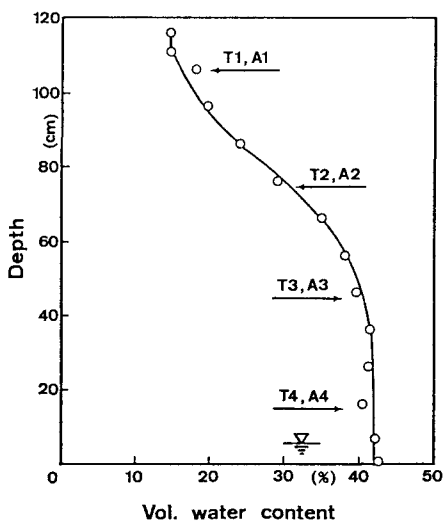


図3 体積含水率の鉛直分布

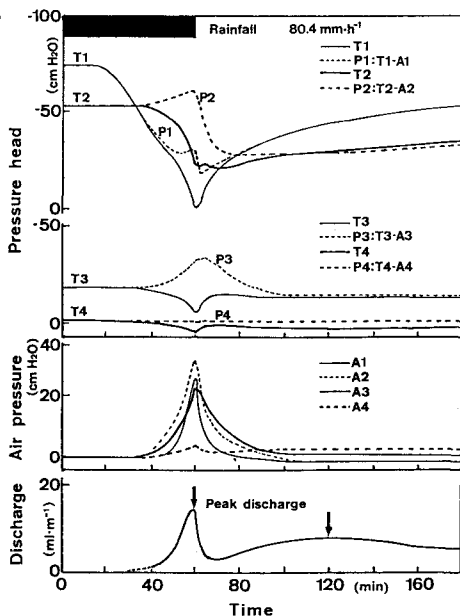


図4 降雨浸透過程における水理諸量の変化