

水分吸脱着測定装置 “AquaLab VSA” を用いた土の水分保持曲線の測定 Successive measurements of soil water retention curves using “AquaLab VSA”

渡辺晋生・○取出伸夫・坂井 勝

Kunio WATANABE, Nobuo TORIDE, Masaru SAKAI

はじめに 鏡面冷却式のサイクロメータ (Decagon 社 WP4 等) が普及し、土の低水分領域の水ポテンシャルを迅速且つ簡便に測定できるようになった。しかし、通常のサイクロメータによる土の水分保持曲線の測定では、同一試料による連続測定が困難であり、一連の試料の乾燥密度や水分量の調整に課題が残されている。また、低水分領域のヒステリシスは測定例がほとんどない。一方、食品や材料工学の分野では、水分量を変化させながら同一試料の水ポテンシャルを連続的に測定する水分吸脱着測定装置が品質管理や物性試験に使われている。本研究では、鏡面冷却式サイクロメータを内蔵した Decagon 社の自動水分吸脱着測定装置 AquaLab VSA (Vapor Sorption Analyzer, 以下 VSA) を用いて土の低水分領域における吸水過程と脱水過程の水分保持曲線を測定し、VSA の測定特性を評価した。

試料と方法 試料には風乾した鳥取砂丘砂、藤の森シルトローム、十勝黒ボク土を用いた。いずれの試料も電気伝導度は低く、浸透ポテンシャルを無視できるとした。図 1 に吸引法、加圧板法、WP4 を用いて測定した各試料 (乾燥密度はそれぞれ 1.18, 1.45, 0.95 g cm⁻³) の水分保持曲線を示す。図中実線は van Genuchten 式による適合曲線である。VSA の概要を図 2 に示す。内径 37 mm のステンレスセルに数 g の試料を広げ、精度 0.1 mg の秤上に静置する。試料室を密閉後、一定流量の湿度を調整した空気を送風する。レーザー光を試料室内の鏡面に照射しながら、鏡面温度をペルチェ素子で上下する。そして、反射光の強度変化から鏡面の結露を判定し、試料室の露点 (鏡面温度) を測定する。同時に、赤外温度計により試料の温度、精密秤により重量を測定する。これらの温度差から湿度と平衡した水ポテンシャル H を、重量変化から試料の水分量をそれぞれ求める。VSA では、一定湿度の空気を送風し、水分量が平衡に達した試料の水ポテンシャルを計測する DVS (Dynamic Vapor Sorption) 方式と、送風空気の相対湿度を徐々に変化させながら、試料の水分量と水ポテンシャルの変化を連続的に測定する DDI (Dynamic Dewpoint Isotherm) 方式を選択できる。また、VSA は水ポテンシャルの測定可能領域を $-7.2 \times 10^4 > H > -5 \times 10^6$ cm に仕様上制限している。

結果と考察 図 3 に DVS 方式で測定した藤の森シルトロームの水分保持曲線を示す。この際、試料の重量変化が 0.01 % h⁻¹ 以下になったときを平衡に達したと見なした。送風空気の相対湿度は、0.1 刻みで 0.1 から 0.95 へ段階的に上昇 (吸水) させ、折り返し 0.95 から 0.1 へ段階的に下降 (脱水) させた。吸水過程と脱水過程の水分特性曲線には $H = -7.2 \times 10^4$ と -5×10^6 cm で閉じたヒステリシスが見られた。ヒステリシスの差は $H = -2.5 \times 10^5$ cm 付近で最大約 0.008 m³m⁻³ となり、吸脱水過程全領域の測定には 84 h を要した。

次に、DDI 方式により送風空気の相対湿度を 0.1 から 0.95 へ徐々に上昇後、0.1 へ再下降させて水分保持曲線を求めた (図 3)。送風流量を 500, 100, 25 mL min⁻¹ と減少させると、全領域の測定時間は 12, 51, 411 h と次第に長くなった。25~200 mL min⁻¹ の送風流量で

定した藤の森シルトロームの水分保持曲線にはほとんど差が見られなかったが、送風流量を 500 mL min^{-1} 以上にするると、他の流量に比べて吸水過程の水分量を過小評価した。また、最小流量の 10 mL min^{-1} では、水ポテンシャルを $-1.6 \times 10^6 \text{ cm}$ 以上に加湿できなかった。設置する実験室の湿度にも依存するが、小さすぎる送風流量の DDI 方式では、試料の水分量を十分に制御できない。DDI 方式と DVS 方式を比べると、 $25 \sim 200 \text{ mL min}^{-1}$ で測定した DDI 方式の水分量は、脱水過程において DVS 方式よりわずかに大きい。両方式で測定した吸水過程と脱水過程の水分保持曲線に有意な差は見られなかった。精度の高い DDI 方式を行うためには、測定時間を考慮すれば、 100 mL min^{-1} 程度の流量が妥当であろう。

図 4 に、各試料について流量 100 mL min^{-1} の DDI 式で測定した水分保持曲線を、図 1 の適合曲線と合わせて示す。いずれの試料も $-7.2 \times 10^4 > H > -5 \times 10^6 \text{ cm}$ の水分保持曲線（吸水後脱水過程）を 50 h 程度で測定できた。また、鳥取砂丘砂と十勝黒ボク土のヒステリシスは、最大でそれぞれ $0.0005 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0.005 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ だった。VSA の秤の精度は現在 0.1 mg であるが、今後 0.03 mg へ向上することが検討されている。測定可能な水ポテンシャル領域も、測定法の工夫や今後の装置の改良により $H = -10000 \text{ cm}$ 近くのより湿った条件まで向上する可能性がある。土の不飽和透水係数の推定や、乾燥領域での水分保持機構、土粒子表面の水膜の性質などの詳細な検討へ、VSA の応用幅が今後広がると期待される。

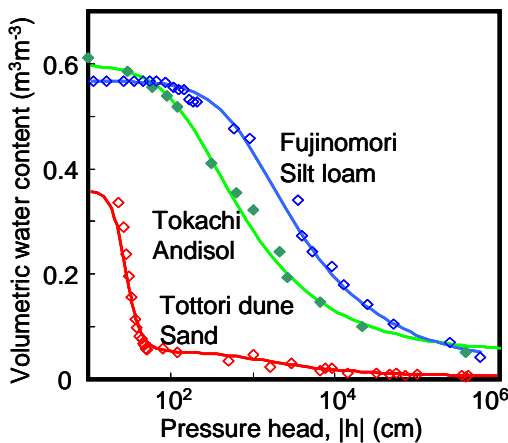


図1 試料の水分保持曲線
Soil water retention curves for 3 soils.

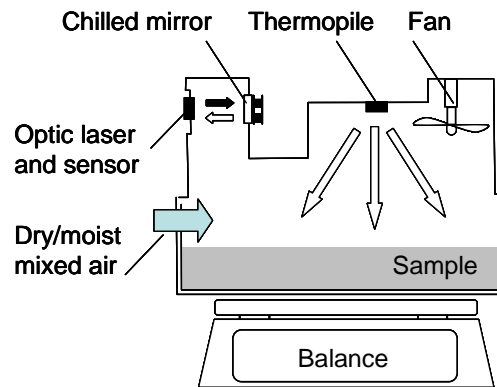


図2 装置の概要
Schematics of Vapor Sorption Analyzer.

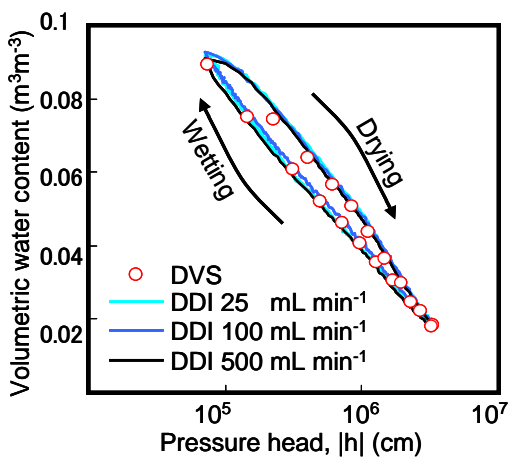


図3 DDI方式とDVS方式の比較
Soil water retention curves for the Silt loam measured by DDI and DVS methods.

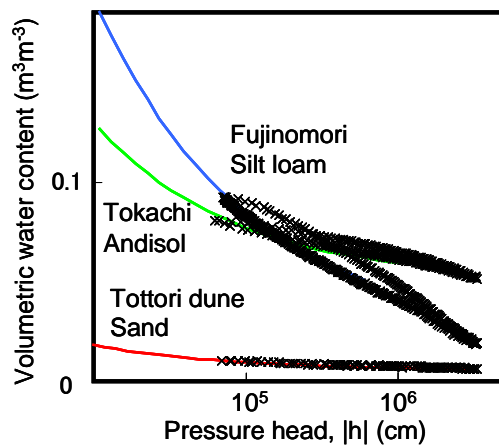


図4 VSAで測定した3種の土の水分保持曲線
Soil water retention curves for three soils measured by DDI method.