

湛水浸潤過程の水の挙動

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者	佐久間, 敏雄 増谷, 雪雄
巻/号	60巻4号
掲載ページ	p. 307-312
発行年月	1989年8月

湛水浸潤過程の水の挙動*

重水をトレーサーとしたインタークレート測定法の検討

佐久間敏雄**・増谷雪雄**

キーワード インタークレート, 浸潤, トレーサー, 重水, 不均一性

1. はじめに

土壌の侵入能を評価する簡便な方法としてインタークレート¹⁾がしばしば用いられる。原法はMUSUGRAVE²⁾の提案によるもので、直径30cm内外の円筒を土中に10~15cmの深さまで打ち込み、その内側に湛水した状態で円筒内の水位変化を測定して、土壌の水取込み速度を測定する。この方法は、1)側面が円筒によって拘束されており、サンプリングエリアが小さい、2)湛水条件下で急速な浸潤が起るために、封入空気の影響が大きい、3)円筒打ち込みのさいに周辺部が多少とも乱されるなどの問題点を含んでいる。

第1の問題点は、浸潤過程における水移動の空間的スケールに関係している。浸潤過程の水移動には空間的スケールの大きい粗孔隙が重要な役割を果たしていると考えられ、サンプリング位置による変動が著しい。インタークレートの測定には、通常、直径30cm程度の円筒が用いられるが^{1,2)}、多くの自然土壌について、このサンプリングエリアが十分かどうかはわからない³⁾。かんがい計画など、実用的な目的にこの方法を用いる場合には、現場実験と併用することが推奨されている¹⁾が、この方法によるインタークレートの測定過程における、浸潤水の挙動についての実証的データは得られていない。

この報告の目的は、インタークレート測定過程における水移動の不均一性を明らかにし、上記の問題点について考察することにある。

2. 調査地および実験方法

調査地として、土壌の性質が対照的な3地点を選定した(第1表)。石狩はA/C型の砂丘未熟土からなる。A層の発達が悪く、6~8cm以下は単粒状の粗砂土からなる。薄い水平方向の層理がわずかに認められるが、全

体として均質である。高岡は内部排水の悪い細粒質の疑似グライ土で、Ap/Bg/Cgの層序を示す。水田転換畑で、Ap層の腐植含有率が低く、粗大な土塊が多いこと、Bg層は緻密な角柱状構造からなり、縦方向の孔隙が卓越していること、Cg層はカベ状(massive)で透水性が低いことなどが特徴である。天塩は明渠および暗渠によって排水された高位泥炭土である。偽繊維質のミズケ・ホロムイスケ泥炭と繊維質のホロムイスケ泥炭が交互に堆積した土壌で、水平方向の堆積構造が卓越している。明渠から3m離れた暗渠と暗渠の間点で実験を行った。

インタークレートを常法¹⁾によって測定するとともに、その近傍で重水注入試験を行った。注入にはインタークレート測定用円筒(内径:290mm, 310mm)を用い、インタークレート測定時と同様に、円筒内外に湛水した条件下で、一定量の重水を浸潤させた。注入する重水のD/Hモル比(以下たんにD/Hと表記する)は、原土壌の水分率、重水の分析精度⁴⁾を考慮して、2000~6000ppmの範囲で選択した。注入実験の概要を第2表に整理しておく。注入が終了し、表面湛水が消失した後、円筒内に目の開き50×50mmの金網を置き、その各区画内(18区画)で内径35mm、有効長さ200mmの採土器によって土壌コアを採集した。採取したコアは、深さ方向に2.5, 5あるいは10cmに切断して1試料とした。ただし、天塩については採土器を使用できなかったため、ナイフを用いて金網の目に沿って切れ目を入れた後、層別に切り取る方法を使った。なお、石狩、天塩については、20cmより深い層位になると、試料の分割採取は困難であった。両地点のそれ以深については、円筒を取り除いた後、土壌断面を作製して常法により試料を採集した。

試料は密封して実験室に持ち帰り、水分率を測定するとともに真空蒸留法⁴⁾によって試水を分離・精製して、D/Hの分析に供した。また、別に採取した定容積試料(石狩、高岡100cm³、天塩1000cm³)によって容積重その他必要な項目の分析を行った。

* 土壌中の水移動解析における重水の利用(第4報)

** 北海道大学農学部(060 札幌市北区北9条西9丁目)

1988年10月20日受理

日本土壌肥科学雑誌 第60巻 第4号 p.307~312 (1989)

第1表 調査地点の土壌概要

地点	地形	母材	土壌名	層序	A/B層の構造	土地利用
石狩	砂丘	砂丘砂	砂丘未熟土	A/C	屑粒状/単粒状	林地
高岡	段丘地	段丘粘土	疑似グライ土	Ap/Bg/Cg	亜角塊状/角柱状	畑地
天塩	低地	泥炭	高位泥炭土	Ap(O1)/O2	黒泥/層状繊維質	草地

第2表 重水注入実験の概要

地点	注入重水D/H (ppm)	注入水量 (mm)	浸潤時間 (min)
石狩	2200	50	3.8
高岡	5910	50	8640
天塩	3150	50	3.5

3. 結果と考察

平均 D/H の垂直分布を第3～5表に示す。区画別に試料を採取した層位については、別々に分析した結果の総平均値を示した。また、円筒の内径に沿って採取した5区画のサンプルをそれぞれ分析した結果を用いてD/H等値線図を作成した(第1～3図)。なお、等値線は近傍実測値の加重平均を用いて補間することによって描いた。

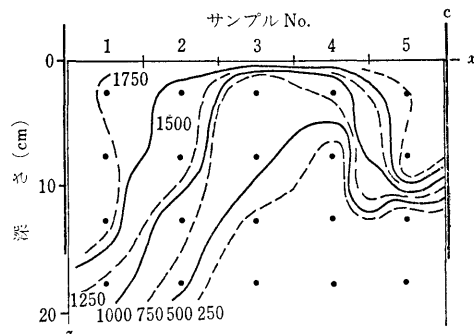
1) 石狩

浸潤後のD/Hの垂直分布では、深さ2.5～5cmの鋭い落込みが特徴的である。水分率の分布からも明らかのように、浸潤水はこの層位を十分濡らすことなく、下層に到達した。実験時表層土壌は著しく乾燥しており、海浜性草本の細根が密集した部分は撥水性が著しかった。深さ5cm以下については、水分率が大幅に増加するとともに、平均D/Hも0～2.5cmのそれとほぼ同一の水準に達している。したがって、浸潤水は草本類の根株跡や円筒沿いの粗孔隙を透過して、表層部の土壤水とほとんど混合しないままに5cm以下の土層に到達したものと考えられる。

第3表 水分率、平均D/Hの垂直分布(石狩)

深さ (cm)	浸 潤 前		浸 潤 後	
	水分率 (cm ³ /cm ³)	平均D/H (ppm)	水分率 (cm ³ /cm ³)	平均D/H (ppm)
0～2.5	0.044*	148*	0.066	1482
2.5～5			0.028	765
5～10	0.142	145	0.201	1478
10～20	0.130	138	0.258	927
20～30	0.131	137	0.163	215
30～40	0.101	138	0.104	171
40～50	0.085	142	0.085	166
50～60	0.080	142	0.081	152

* 深さ0～5cmについて測定した。



第1図 表層部のD/H分布(石狩)

浸潤終了後約30min目のサンプリングによる。●、測点；c、内筒；x、水平方向；z、鉛直方向；等値線に付した数値、D/H(ppm)；No.1～5、直径に沿ったサンプリング位置。

D/Hは深さ20～30cmの層で急減するが、それ以下でも深さ60cmまでは、150～220ppmと自然存在比より有意に高い値を保っている。一方、深さ30cm以下の水分率には、実験の前後で、ほとんど差が認められない。これは、ごく少量ではあるが、高濃度の重水を含む水が深さ30～60cmまで到達したことを示している。砂丘土壌には頻度は低いが、海浜性植物の枯死根に由来する連続した管状粗孔隙が深層まで存在する。上記の結果は、こうしたチャンネルあるいはパイプが水みちになって、浸潤水の一部が素早く深層まで到達したことを示唆している。

表層部のD/H分布(第1図)からは次のことが明らかである。①極表層を除いて、D/Hは中央部で低く、周辺部で高くなっている。これは円筒打込みの際の衝撃によって緩んだ周辺部の砂層および円筒と砂層の間に形成された粗孔隙を経由した速い浸潤によるものと推定される。②深さ2.5～15cmのD/Hはサンプリング位置、深さによる変動が著しく大きく、D/H>2000ppmのサンプルと自然存在率に近いサンプルが隣り合って出現したり、深い層位のサンプルのほうがその直上のサンプルより10倍近い高濃度を示す例が出現したりした。③No.1側の高濃度域は円筒の下端に到達しており、トレーサー溶液が円筒の外側に逸出したことを示唆している。④No.5では、深さ5～10cmにD/H>1800ppmの測点が見られ、その周辺に大きな濃度勾配が生じている。こ

の位置では、深さ 15cm 以上の D/H は 250 ppm 以下となっており、浸潤水が表層部（深さ 10cm まで）に停滞したことを示している。x 軸方向の濃度勾配もサンプル No. 1～3 で小さく、同 No. 4, 5 で大きくなっている。

この調査地点は、粗孔隙とマトリックスの対照が不明瞭な比較的均質な土壌を想定して選ばれたものであるが、結果は必ずしも予期したようにはならなかった。第 3 表の結果を併せて考えると、湛水状態で進行した周辺部の急速な浸潤と乾燥した有機物を含む砂層の撥水性によって、表層部に多量の逃げ場を失った封入空気が蓄積し、その排除のされかたによって浸潤水の不均一な分布をもたらされたものと考えられる。

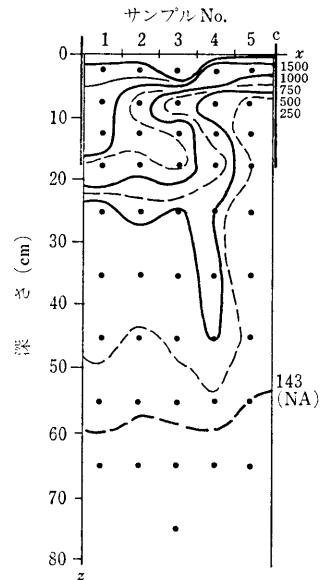
2) 高岡

平均 D/H の垂直分布では、①作土層（深さ 0～20cm）の値が極端に高い、②深さ 20～30cm で急激に低下する、③深さ 60cm 以下では自然存在率と同水準になるなどのことが注目される（第 4 表）。第 2 表に示したように、この地点では 50mm の注入水が完全に土中に浸入するのに約 6 日を要している。注入初期にやや急速な取込みがみられた後、浸入速度は 10～5 mm/d の低い値になった。注入前後の水分率の変化も併せて考えると、この地点では、注入初期に乾燥した作土層に水が取り込まれた後、作土層下部に停滞し、心土への浸潤はごく限られたものであったことがわかる。

このことは D/H の断面内分布（第 2 図）によっても支持される。この結果で注目されるのは次の諸点である。①D/H > 2500 ppm であるのは 0～2.5cm の極表層のみであり、実験時乾燥状態にあった極表層に浸潤水が多量に取り込まれたことを示している。②深さ 5～20cm の層位では、サンプリング位置による D/H の変動が著しく、作土中の大土塊が均一な浸潤を妨げたことを示している。③No. 1～3 では、深さ 20cm 付近に D/H

第 4 表 水分率、平均 D/H の垂直分布（高岡）

深さ (cm)	浸 潤 前		浸 潤 後	
	水分率 (cm ³ /cm ³)	平均D/H (ppm)	水分率 (cm ³ /cm ³)	平均D/H (ppm)
0～5	0.277	145	0.407	2449
5～10	0.344	148	0.395	897
10～15	0.373	139	0.397	1248
15～20	0.412	135	0.415	935
20～30	0.500	139	0.514	446
30～40	0.490	140	0.502	369
40～50	0.522	141	0.527	339
50～60	0.535	139	0.537	170
60～70	0.517	140	0.517	141
70～80	0.521	137	0.510	142



第 2 図 表層部の D/H 分布（高岡）
D/H=143 ppm(NA) は自然存在率。
他は第 1 図の注参照。

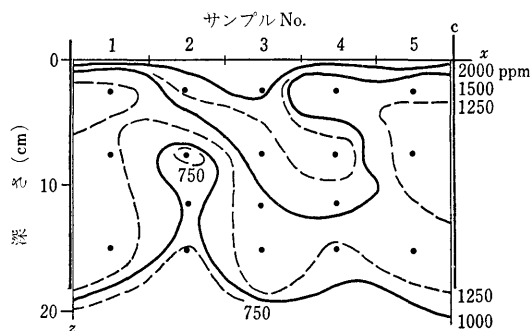
が 1250 ppm から 500 ppm に急低下する浸潤前線を明瞭に判別でき、浸潤水が緻密な心土表面で停滞したことを示している。④No. 4 のみで、D/H=500 ppm の等値線が舌状に垂下して深さ 45cm に達している。この部分では、深さ 20～50cm にかけてほぼ等しい D/H（約 500 ppm）が観測され、z 方向の濃度勾配が認められない。すなわちこの部分の降下浸透はポテンシャル勾配に依存しない流れによるものであったと考えられる。また、舌状に垂下した部分の x 方向には大きな濃度勾配が生じているが、その方向へのトレーサの拡散はごく限られたものである。このことは、浸潤水は心土（Bg 層）の粗孔隙に急速に浸入したが、これからの側方浸透による拡散はきわめて遅い過程であることを示している。⑤自然存在率の平均値 D/H=143 ppm の等値線はほぼ水平で、どの区画でも 60cm 以下には達していない。すなわち、浸潤開始後 6 日経過しても Cg 層には浸潤水はほとんど取り込まれていない。⑥No. 5 では、D/H=250 ppm の等値線が 5～10cm の層位にあり、深さ 10～60cm にかけて D/H=170～250 ppm となっている。作土層中の緻密な大土塊による不均一な浸潤は下層にも影響を及ぼしている。

3) 天塩

D/H 平均値の垂直分布（第 5 表）では、①深さ 0～20cm とそれ以下の D/H のギャップが著しく大きい、

第 5 表 水分率, 平均 D/H の垂直分布 (天塩)

深さ (cm)	浸 潤 前		浸 潤 後	
	水分率 (cm ³ /cm ³)	平均D/H (ppm)	水分率 (cm ³ /cm ³)	平均D/H (ppm)
0~5	0.360	139	0.416	1520
5~10	0.472	137	0.550	1374
10~20	0.607	140	0.630	1198
20~30	0.756	141	0.776	210
30~40	0.768	141	0.766	166
40~50	0.791	143	0.794	154
50~60	0.796	144	0.796	146

第 3 図 表層部の D/H 分布 (天塩)
第 1 図の注参照。

②深さ 40cm 以下の D/H はきわめて低く, 50cm 以下になるとトレーサーはほとんど到達していないなどのことが特徴的である。浸潤前, 表層泥炭はかなり乾燥しており, 前後の水分率変化から浸潤水の約 20% が 0~20cm の泥炭に吸収され, 残りがそれ以下に浸透したと推定される。しかし, 深さ 20cm 以下の水分率変化はごくわずかで, D/H も急減している。添加した重水の回収率は表層 0~10cm で 15%, 0~20cm で 25%, 全体 (0~60cm) で約 50% であった。トレーサーの濃度分布からみて, 浸潤水は深さ 50cm 以下には到達していなかったと推定されるので, 浸潤水の約 50% が深さ 20~50cm の層位における側方浸透によって失われたと考えられる。

表層部の D/H 分布 (第 3 図) は次のような特徴を示す。①等値線は No. 2, 3 など下層に垂下し, 浸潤水が特定の箇所を通過して下層に浸入したことを示している。②中間層 (5~15cm) の D/H はサンプリング位置による変動が大きい (サンプル No. 2-2, 4-2 など)。③深さ 15cm 付近で等値線が x 方向に広がり, 下層に向かって一様, かつ急速に D/H の低下が起こったことを示している。すなわち, 浸潤水の半分程度は, 円筒の下端付近からの側方浸透によって測定領域外へ逸出したものと考えられる。

重水注入地点付近の泥炭は次のような特徴を示す。①表層 15cm までは作土層で, 乾燥して分解の進んだ黒色 (10 YR 2/2) の無定形泥炭からなるが, 随所に腐朽した根株や繊維質泥炭の残渣を含む。②深さ 15cm からはホロミスゲ・ワタスゲを主構成植物とする偽繊維質の泥炭となり, 層状の堆積構造を持つ。③また, 水分率はこの層位から急増し, 容積重は 0.1 g/cm³ 以下となる。④粗孔隙系は層間の x 方向の孔隙, 水性植物の地下茎跡, 泥炭の堆積むらによる孔隙, 腐朽した樹木根跡などからなる。浸潤水の不規則な分布はこうした泥炭の不均一性を反映するものと考えられる。

4) 浸潤の不均一性とインタークレート測定上の問題点

浸潤過程では, 腐朽根跡のチャンネル, 亀裂, 大土塊間の粗孔隙などが水の挙動に大きな影響を及ぼすこと⁵⁻⁷は今回の調査結果からも明らかである。調査した 3 地点の土壌について, 粗孔隙系はそれぞれ違った形態とスケールを持つ。石符を除く 2 地点については, 円筒を用いたインタークレート測定が, その下層土の不均一な状態に対して十分なサイズを持っていないことは明らかである。石符については円筒打込みの衝撃による土層の乱れが問題であるが, この影響を少なくするためには, やはり円筒の径を大きくする以外に方法はなさそうである。

最小サンプリングエリアがいかにほどかについては一概にはいえない。たとえば, 高岡についてトレーサーが舌状に浸入した部分は, 角柱状構造間の肉眼的に識別できる粗孔隙と推定され, 断面調査の結果によればその x 方向の頻度は平均 15~20cm に 1 本程度である⁹。したがって, このような粗孔隙を 5 本程度測定エリアに含めるとすれば, x 方向に少なくとも 100cm の広がりをとる必要があることになる。また, 天塩の No. 3 付近にみられた浸潤が旺盛であった部分は灌木の根株を取り除いた跡とみられる。この付近の泥炭地の植生調査結果⁹によれば, ヤチヤナギ等の灌木の群落内間隔は平均 15cm 程度ある。大きな根株跡を複数個含めるとすれば, やはり 100cm 程度の広がりをとる必要がある。

泥炭土の場合には円筒による側方浸透の阻害も問題である。一般に, 泥炭土のインタークレートはきわめて低い値になるが, 側方を拘束しない条件では大きな散水強度を与えても, 表面流去水は発生しない⁹。これは, 水平方向に発達した泥炭の特異な堆積構造を反映するものと考えられる。円筒壁によってこの粗孔隙系による側方浸透が阻止されると泥炭の水取込み能力は激減する。この欠点は, 円筒の直径を 60cm にしても回避できない

(佐久間ら, 未発表). 同様の現象は, 表層部に板状構造の発達した火山性土壌でも認められている⁵⁾.

以上の結果および考察から明らかなように, 直径 30 cm 程度の円筒を用いたインテークレートの測定結果は, 粗孔隙系の構造とスケールに強く依存し, 測定値のばらつきが大きだけでなく, 実際の土壌の浸入能を反映しないことが多い. 定量的に信頼できる結果を得るためには, 現在一般に用いられる直径 30 cm 程度の円筒は多くの場合不十分である. とくに, 疑似グライ土や泥炭土のようにスケールの大きな粗孔隙系を持つ土壌については, その適用および結果の吟味を慎重にしなければならない.

4. 要 約

円筒法によるインテークレート測定過程における浸潤水の挙動を明らかにし, この方法の問題点を検討する目的で, 3種の土壌について, 重水をトレーサーとした浸潤水の追跡実験を行った.

1) 各土壌とも浸潤水の分布はきわめて不均一で, その挙動を記述するには, 少なくとも二つの性格の異なる流れ, すなわち, 粗孔隙系の流れとマトリックス内の流れを考慮する必要がある.

2) 砂丘未熟土(石狩)は均一な外観を呈したが, 浸潤水の分布は予想以上に不均一であった. この理由として, ①植物の茎, 枯死根などによる管状粗孔隙, ②乾燥した表層土壌の撥水作用, ③円筒打込みの衝撃による周辺部の乱れ, ④封入空気の影響等が考えられた.

3) 疑似グライ土(高岡)では, マトリックスと粗孔隙の対照が最も明瞭であった. 作土層であっても, 緻密な土塊が存在すると, 浸潤水の均一な分布は得られなかった. 心土(Bg層)では, 柱状構造間の x 方向の粗孔隙と緻密なマトリックスの対照が顕著であった. 作土下部に一時停滞した浸潤水はBg層の粗孔隙を経由して, Cg層上面まで到達し, マトリックス内に取り込まれるが, その速度はきわめて小さい.

4) 高位泥炭土(天塩)の浸潤水の分布は, 泥炭の層

状の堆積構造を反映して, 局所的な浸透や停滞を繰り返しながらジグザグに浸透が起こったことを示していた. 粗孔隙系は①層間の x 方向の孔隙, ②草本の地下茎跡, ③樹木の根株・腐朽根跡などからなる.

5) 円筒法によるインテークレートの測定は簡便であるが, サンプリングサイズが小さく, 側方が拘束されているために結果の変動が大きく, 定量性に欠ける. 粗孔隙系のスケールを考慮したサンプリングサイズを採る必要がある. 円筒の打込みによる周辺部の乱れを考慮に入れると, 供試した3土壌について円筒の径 30 cm はいずれも十分ではないと判断された.

文 献

- 1) 水之江政輝：侵入・浸潤, 土壌物理性測定法, 土壌物理性測定法委員会編, p.168~177, 養賢堂, 東京(1972)
- 2) MUSUGRAVE, G. W.: The infiltration capacity of soils in relation to the control of surface run-off and erosion. *J. Am. Soc. Agron.*, **27**, 336~345 (1935)
- 3) 佐久間敏雄：斜面の物質移動と土壌・地形発達, 移動現象—土壌をめぐるエネルギーと物質の転流, 日本土壌肥料学会編, p.109~138, 博友社, 東京(1977)
- 4) 佐久間敏雄・倉持寛太・斉藤英樹・増谷雪雄・望月美千代・森下謙三：土壌中における重水の挙動追跡法—分析の精度と試料調整法, 土肥誌, **60**, 197~202 (1989)
- 5) 佐久間敏雄・老松博行・飯塚文男・岡島秀夫：乱さない土層中における物質移動の不均一性, 同上, **50**, 10~16 (1979)
- 6) 波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫：メチレンブルートレーサー法による水みちの分布状態, 同上, **55**, 344~350 (1984)
- 7) BEVEN, K. and GERMANN, P.: Macropores and water flow in soil. *Water Resour. Res.*, **18**, 1311~1325 (1982)
- 8) 矢野悟道・竹中則夫・大川 徹：湿原植生の地下構造, 泥炭地の構造, 北海道開発局編, p.52~66, 北海道開発局, 札幌(1984)
- 9) 佐久間敏雄・増谷雪雄・沖田良隆・小林信也：泥炭地の排水工法とその効果—産土泥炭地における浸潤水(重水)の追跡, 土壌-植物系における水およびイオン移動の研究への安定同位元素の利用, 佐久間敏雄編, p.42~55, 北海道大学農学部, 札幌(1987)

Water Movement in Infiltration under Pondered Condition
A Criterion on the Double Ring Infiltrometer Method Based on Tracer
Experiments by Using Deuterium Water

Toshio SAKUMA and Yukio MASUYA
(*Fac. Agric., Hokkaido Univ.*)

Tracer experiments using deuterium water were conducted to grasp the movement of infiltrating water and to discuss the problems of determination of infiltration capacity in the field. The experiments were carried out for three soils, *i. e.* Sand dune regosols (Typic Udipsammments), Pseudogleys (Aquic Dystrochrepts), and Highmoor peat soils (Typic Medifibrst). After the injection of deuterium solution through the inner cylinder of a double ring infiltrometer, soil samples were taken at each point fixed by a 5×5 cm grid using a hand auger and separated by convenient depth increments. The volume wetness and D/H of soil solution were determined for each sample.

The Sand dune regosols appeared homogeneous, but the distribution of D/H was unexpectedly uneven in both vertical and horizontal direction. This may be attributable to 1) by-pass flows through very coarse root channels, 2) water repellency of the extremely dried top soil, 3) entrapped air in the dried top soil, and 4) mechanical disturbance of soil structure by intrusion of the inner cylinder. In clayey Pseudogleys the difference between macropore flows and matrix flows was most remarkable among the three soils examined. Since the very compact large peds are often contained, the uniform distribution of infiltrated water was not obtained even in the cultivated top soil. The uneven distribution of D/H in the subsurface horizons is mainly caused by vertical non-Darcian flows through interstitial macropores among very coarse prismatic peds. It seemed that the infiltrated water was stagnated temporarily in the deeper part of Ap, flowed rapidly into vertical macropores, and stagnated again in the deeper Bg horizon. The flows of infiltrating water in the Highmoor peat soil were tortuous, reflecting its horizontal structure and peculiar macropore system consisting of 1) horizontal inter-layer macropores, 2) coarse channels originated by deterioration of subterranean stems of herbaceous plants, and 3) deteriorated roots and stocks of woody elements.

Because the size of the inner cylinder, 30 cm in diameter, is not enough for all the cases examined here, it is concluded that the method may not be reliable, though it is convenient for the field determination of infiltration capacity. The size should be carefully selected taking into account the scale of soil macropore system.

Key words double ring infiltrometer, infiltration capacity, soil macropore, deuterium water, stable isotope tracer

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., 60, 307-312, 1989)