

DB  
306  
1225  
(4)

寄	贈
豊満 幸雄 氏	平成 年 月 日

モデル土層における飽和状態からの排水に関する研究

— 特に閉鎖系の後退線移動について —

1985

豊満 幸雄

89001576

目 次	頁
主な記号と用語の説明	1
第 I 章 緒 論	2
第 II 章 本研究の位置づけと本研究に係わる従来の研究	4
1. 土中水の運動形態における本研究の位置づけ	4
2. 飽和状態からの排水に関する従来の研究と問題点	6
第 III 章 後退線と後退毛管力の定義および後退排水式の適用	16
1. 後退線の定義	16
2. 後退毛管力 $h_{dc}$ と後退毛管高 $h_c$ の定義	17
3. 後退排水式の適用	18
第 IV 章 ガラスビーズ・砂の単層における後退線の移動と後退排水式の検証	19
1. はじめに	19
2. 後退排水実験	19
1) 試料	19
2) 実験装置	20
3) 実験方法	24
3. 実験結果と考察	27

1) 実験から得た $q_d \cdot Y$ と $Y$ の関係	27
2) 後退毛管力 $h_{dc}$ の実測値	30
3) 積算排水量 $Q$ と後退線の位置 $Y$ との関係	32
4) 後退排水式適用の検討	33
5) 後退毛管力 $h_{dc}$ の検討	37
6) 後退線の位置 $Y$ と時間 $t$ の関係	42
4. まとめ	44
第 V 章 ガラスビーズの成層における後退線の移動と 後退排水式の検証	46
1. はじめに	46
2. 単層の実験結果から推測した上層と下層の 後退毛管力と後退排水式	47
1) 上層の後退毛管力 $h_{dc_1}$ と後退排水式の推測	47
2) 下層の後退毛管力 $h_{dc_2}$ と後退排水式の推測	52
3. 後退排水実験	52
1) 試料	52
2) 実験方法	52
4. 実験結果と考察	54
1) 上層の後退毛管力 $h_{dc_1}$ , 上層と下層の境 界の圧力水頭 $h_p$ の推定値とその実測によ る確認	54

2) 下層の後退毛管力 $h_{dc_2}$ の検討	57
3) 上層と下層における後退排水式の検討	64
4) 後退線の位置 $Y$ と時間 $t$ の関係	68
5. まとめ	72
第VI章 充填土による検証	75
1. はじめに	75
2. 後退排水実験	76
1) 試料	76
2) 実験方法	76
3. 実験結果と考察	78
1) 単層の後退排水	78
2) 成層の後退排水	84
4. まとめ	87
第VII章 総括	89
謝辞	94
引用文献	95

## 主な記号と用語の説明

後退線：飽和状態からの排水において，未排水部（飽和領域）と排水部（不飽和領域）との境界で，本研究では，“最も進行したメニスカスに接し，流れの方向に対して垂直な断面”と定義する。

$h_{dc}$ ：後退毛管力（後退線の圧力水頭）[cm]

$h_c$ ：後退毛管高（後退線が停止したときの排水面から後退線までの高さ）[cm]

$h_a$ ：限界負圧（空気侵入値）[cm]

$A$ ：試料層断面積 [cm<sup>2</sup>] （本論文では， $A = 19.6 \text{ cm}^2$ ）

$f$ ：比産出量（単位体積当りの排水量）[cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]

$Q$ ：積算排水量 [cm<sup>3</sup>]

$t$ ：後退排水開始からの経過時間 [s]

$q_d$ ：排水強度 [cm/s]

$K_d$ ：後退排水時透水係数 [cm/s]

$K_p$ ：浸透時透水係数 [cm/s]

$h_o$ ：下層下端（単層では層下端）の圧力水頭（排水位）[cm]

$h_p$ ：上層と下層の境界の圧力水頭 [cm]

$h_{p'}$ ：(5.6) 式で求めた  $h_p$  [cm]

$h_b$ ：後退線直上の空気圧 [cm]

$h_{dc_1}$ ： $Z \rightarrow 0$  の時の  $h_{dc_1}$ （上層下端の後退毛管力）[cm]

$L$ ：層の厚さ [cm]

$Y$ ：後退線の位置（下層下端－単層では層下端－から後退線までの距離）[cm]

$Z$ ：上層における後退線の位置（上層下端から後退線までの距離）， $Z = Y - L_2$  [cm]

$\alpha, \beta, \gamma, \omega$ ：定数

注：図中および本文中の各記号の添字の 1 は上層，2 は下層， $n$  は  $n$  層を示す。単層の記号には数字の添字は付けずに表した。

## 第 I 章 緒論

農業土木学会の定義によると，排水とは，“作物生育ならびに農作業機械の運行に対して過剰な地表水ならびに土壌水を排除すること<sup>1)</sup>”であり，これは農業上重要な課題のひとつであることはいうまでもない。

近年，汎用耕地化が進められ，より高度な圃場排水技術が求められるようになってきた<sup>2)</sup>。すなわち，水田を畑地に転換する場合，排水不良による湿害の発生および作業性の不良が大きな問題となっている<sup>3)4)5)</sup>。それは次のような理由による。

1. 畑作では根群域において18%以上の空気間隙率（気相率）が必要と言われており，また水稲作に比べより迅速な過剰水の排除が求められる<sup>6)</sup>。

2. 水田は一般に耕盤を有し，湛水しやすい条件を備えている。

3. 水田は，地下水位が高い立地条件にある場合が多い。

4. 隣接水田から転換畑へ水が浸入してくる<sup>7)8)</sup>。

5. 傾斜地水田地帯では，上部の水田から転換畑へ水が浸入してくる<sup>9)10)</sup>。

これらの問題を解決する手段は，大別すると地表排水と地下排水

とがあるが、より合理的な排水技術を確立するためには、それぞれの排水現象を明らかにすることが必要と思われる。

そこで本研究では、土壌物理学的な観点から、土中水の移動である地下排水—以下、単に排水と書く—を研究対象にし、次のような排水現象について研究した。地下排水技術にとって基本となる重要な問題は、畑作物の正常な生育にとって、湛水状態—これは地表排水で排除する—の次に危険と考えられる湛水消失後の飽和状態からの排水現象を明らかにすることと思われる。すなわち、水田への畑作導入には、作物が正常に生育するために必要な空気間隙を速やかに確保することが求められる。土層からの排水を考えると、後退線の上では空気間隙が生じるので、空気間隙の増大を示す後退線の移動を捕えることが重要になる。

このようなことを踏まえて、本研究では、飽和状態からの排水に関する基礎的な研究として、圃場の土層をガラスビーズや砂などの充填層でモデル化し、このモデル土層について室内実験を行い、そこで起こっている排水現象—後退線の移動—を明らかにする。次に、実際の土壌を充填し、モデル土層における排水現象が供試土壌に適用できることを確認する。なお本研究では、閉鎖系での実験のみを扱った。すなわち、土層側面からの空気侵入はないものとした。

## 第 II 章 本研究の位置づけと本研究に係わる従来の研究

### 1. 土中水の運動形態における本研究の位置づけ

本論文の研究対象である閉鎖系における飽和状態からの排水は、土中水の運動の一形態であるので、土中水の運動形態を簡単に整理し、その位置づけを行う。なお、条件を単純にするため均一層（単層）として説明する。

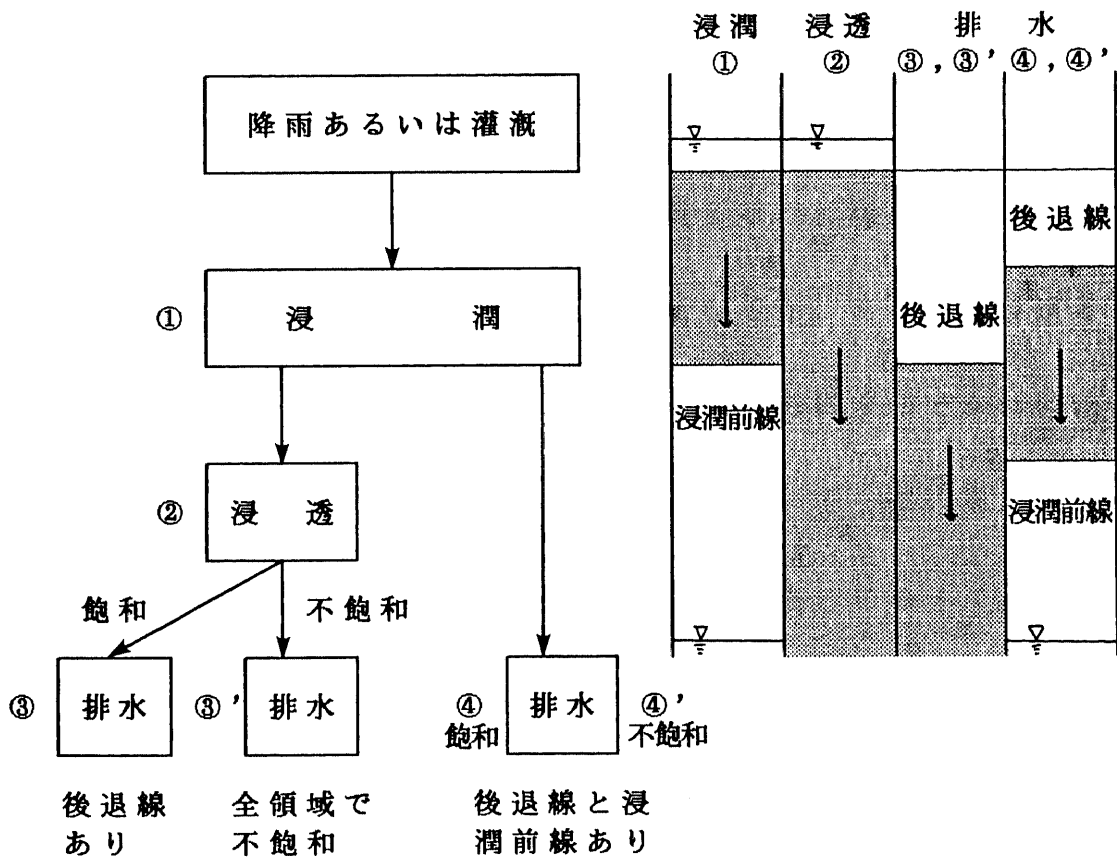


Fig.2-1 土中水運動の形態



Fig.2-1 は、降雨あるいは灌漑時の鉛直方向の土中水の運動形態を模式的に示したものである<sup>11)</sup>。降雨あるいは灌漑があると、水は土中に浸入し、浸潤前線をともなった①の浸潤が起こる。

浸潤前線が地下水面上の Capillary fringe に到達すると浸潤前線は消失して、給水源と流れの末端とが連続した②の浸透に変わる。これらの浸潤や浸透が飽和状態か不飽和状態であるかは、降雨あるいは灌漑の強度、土壌の飽和透水係数、土壌の初期含水量、地下水位などで決まる。成層であれば成層条件も加わる。なお、土中水の運動では、特別な場合を除いて完全な飽和は起こりにくいので、本論文では、閉鎖不飽和も含めて飽和と表現することにする。

②の浸透時に、降雨などの給水量が0になるか、あるいは浸透量より小さくなると排水が始まる。飽和浸透からの排水③であれば、まず湛水がなくなるまで変水位の浸透が起こる。そして、湛水消失の瞬間、地表面にメニスカスが形成され、その後、このメニスカスが降下する。このメニスカスの平均的な水平面を後退線<sup>12)</sup>あるいは排水前線<sup>13)</sup>と呼ぶ。本論文では、前者の用語を使うことにする。したがって、飽和浸透後の排水は、後退線の降下現象として捕えることができる。後退線より上では不飽和な流れが、後退線より下では飽和な流れが生じている。

不飽和浸透からの排水③'であれば，全領域で不飽和な流れが生じている。

また，①の浸潤中に，浸潤前線が流れの末端に到達する前に降雨などの水の供給が停止するか浸潤量を下まわると，浸潤前線と後退線とが同時に存在し，これらが降下する複雑な排水が起こる。このような排水の場合も，後退線と浸潤前線にはさまれた領域だけが飽和な流れ④と，全領域で不飽和な流れ④'とがある。

以上の分類は，流れの境界における毛管力の作用の仕方と空気の存在の有無（飽和，不飽和）によって分類した方法である<sup>14)</sup>。

本論文では，これらの土中水の運動のなかで，Fig.2-1 ③の飽和浸透後の，すなわち飽和状態からの排水について研究する。

## 2. 飽和状態からの排水に関する従来の研究と問題点

土中水の運動に関する研究は，定常飽和浸透に関するDarcyの研究に始まった。その後，非定常現象である浸潤の研究がなされ，その運動方程式となるものは結果として，Darcy式と同じ形になることがわかった。この浸潤の研究をもとに，後退線の毛管力が，浸潤前線の毛管力とは逆向きに作用することから導いた排水式も，当然，Darcy式と類似した式になる。このように浸透，浸潤，排水に関す

る運動方程式は無関係ではないので、次に浸透，浸潤の各式について若干説明を加え，本論文で扱う排水に係わる従来の研究について述べる。

### 1) 浸透について

浸透についての理論は，1856年 Darcyが飽和流について実験的に見つけたDarcy 則に始まると言ってよい<sup>15)</sup>。

Darcy 式は，単層の場合，

$$q = K \frac{h}{\ell} \quad (2.1)$$

q : フラックス [cm/s]

K : 透水係数 [cm/s]

$\ell$  : 浸透距離 [cm]

h :  $\ell$  [cm] 間の全水頭差 [cm]

で表され，土中水の運動方程式として広く用いられている。

一方，不飽和浸透については，不飽和透水係数が毛管ポテンシャルもしくは水分量（体積含水率）と一価関係にあるとして導かれる。

すなわち，Richardsは，Darcy 則と連続式とから，鉛直一次元の場合，

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left[ K(\psi) \frac{d\psi}{dz} \right] + \frac{dK(\psi)}{dz} \quad (2.2)$$

$\theta$  : 体積含水率，t : 時間 [s]， $\psi$  : 毛管ポテンシャル [cm]，

z : 位置ポテンシャル [cm]，K : 不飽和透水係数 [cm/s]

なるポテンシャル方程式を導いた<sup>16)</sup>。

Klute<sup>17)</sup> は、このポテンシャル方程式を水分量に関する方程式に直して拡散型の方程式を得た。すなわち、

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left[ D(\theta) \frac{d\theta}{dz} \right] + \frac{dK(\theta)}{dz} \quad (2.3)$$

ここで、 $D(\theta) = K(\theta) \frac{d\psi}{d\theta}$  : 水分拡散係数である。

(2.2)式、(2.3)式から、時々刻々変化する各位置の水分量や毛管ポテンシャルを求めることができる。

排水に関して、これらの式を基礎として排水現象を解析しようとする研究もあるが、本論文では飽和浸透を基礎として研究を進めることにし、その理由については後述する。

## 2) 浸潤について

浸潤理論は、浸透に適用されるDarcy 式を基礎としている。すなわち、Green and Ampt<sup>18)</sup> は、土壌の間隙を毛細管の束としてモデル化し、Poiseuille 式から浸潤式を導いた。その結果、Darcy 式と類似した式になることがわかった。また、ブダゴフスキー<sup>19)</sup> は、作用力の分析から浸潤式を導き、田淵<sup>20)</sup> はこの式を砂およびガラス粒を用いて検証し、実験結果と一致することを示した。この浸潤式も Darcy 式と同じ形になる。

したがって、浸潤式は、Darcy 式に前進毛管力を導入した式と見ることができる。すなわち、

$$q = K_i \frac{Y + h_o + h_k}{Y} \quad (2.4)$$

$q$  : 浸潤強度 [cm/s]

$K_i$  : 浸潤時の透水係数 [cm/s]

$h_o$  : 湛水深 [cm]

$h_k$  : 前進毛管力 [cmH<sub>2</sub>O]

$Y$  : 上表面から浸潤前線までの距離 [cm]

で表される。(2.4)式を導くにあたり、次の仮定がある。①明瞭な浸潤前線が存在すること、②浸潤前線の負圧－前進毛管力－が時間とその位置にかかわらず一定であること、③浸潤前線の後方の水分量は一定で、したがって、④そこでの透水係数は一定である。

これらの仮定は、後退線を伴う排水現象にも同じ様に使われる。

### 3) 飽和状態からの排水に関する従来の研究

前述したように、飽和状態からの排水では、後退線を境界として飽和領域と不飽和領域の土中水の運動がある。そのため、飽和領域のみを取り扱った研究と、飽和領域と不飽和領域とを連続した流れとして取り扱った研究とに大別することができる。

前者には、Youngs<sup>21)</sup>やLigon 等<sup>22)</sup>の研究がある。Youngsは、浸潤の Green and Ampt の式と同様に、土壌間隙を毛細管の束として

モデル化し、Poiseuilleの式から単層の排水式を導いた。すなわち、

$$-\frac{dz}{dt} = \frac{\rho g r^2}{8\eta} \cdot \frac{z-h}{z} \quad (2.5)$$

$z$  : 毛細管下端からメニスカスまでの位置 [cm]

$t$  : 経過時間 [s] ,  $\eta$  : 液体の粘性係数 [cP]

$r$  : 毛細管の半径 [cm] ,  $\rho$  : 液体の密度 [g/cm<sup>3</sup>]

$h$  : 無限時間後に毛細管に残った液体の高さ [cm]

$g$  : 重力加速度 [cm/s<sup>2</sup>]

(2.5)式は、 $\rho g r^2 / (8\eta) = K$  とおくと、Darcy 式と類似した式になる。

(2.5)式を積分すると、

$$\frac{\rho g r^2}{8\eta} t = L - z - h \ln \frac{z-h}{L-h} \quad (2.6)$$

$L$  : 毛細管の長さ [cm]

を得る。そこで、 $n$ 本の毛細管があって、この時、初期フラックス

$F_0 = n \pi r^4 (L-h) \rho g / (8\eta L)$  ,  $t$ 秒間に排水された水量  $Q =$

$n \pi r^2 (L-z)$  , 無限時間に排水された水量  $Q_\infty = n \pi r^2 (L-h)$

とにおいて、これらを (2.6)式に代入して整理し、近似式に直すと、

$$1 - Q/Q_\infty = e^{-F_0 t / Q_\infty} \quad (2.7)$$

を得る。Youngs はガラスビーズなどを用いての実験の結果から、

(2.6)式の完全解よりも近似式である (2.7)式の方が現象を良く表すと述べ、この理由を、比産出量が一定でないためとしている。これは、平衡時に Capillary fringe より上では漸次、水分が減少し

て、やがて一定になる水分分布ができることから、高さ—位置—によって比産出量は異なると指摘した Childs<sup>23)</sup>の論文をもとにして  
 いる。ところで、Youngs の式は、Jensen 等<sup>24)</sup>が指摘したように、後退線が停止するまでの排水を扱ったもので、無限時間後までの排水を表すことはできない。したがって、 $Q_{\infty}$  の定義を無限時間後の排水量としている点は明らかに間違いである。この  $Q_{\infty}$  は、比産出量をその要因として含むものであるから重要な因子である。したがって、正確に定義しなければならない。理論的には、 $Q_{\infty}$  とは後退線が停止するまでの総排水量と定義すべきである。著者の実験によると、後退線が停止してから約24時間後になお同量の排水量を認めた。Jensen等<sup>24)</sup>は、後退線が停止するまでの排水を“Primary drainage”とし、その後の排水を“Secondary drainage”として区別している。一方、Ligon等<sup>22)</sup>は、Darcy式に Capillary fringe の高さに相当する吸引圧—後退毛管力—を代入して排水式を導いた。すなわち、

$$q_d = K \frac{y - \epsilon}{y + \delta} \quad (2.8)$$

$q_d$  : 排水強度 [cm/s]

$K$  : 透水係数 [cm/s]

$y$  : 排水位から飽和面までの高さ [cm]

(排水位は試料層下端より上に設定してある)

$\delta$  : 試料下端の圧力水頭 (正圧) [cm]

$\epsilon$  : 平衡時の Capillary fringe の高さ [cm]

(2.8)式と連続式とから,

$$\begin{aligned} [(y - \epsilon) / (L - \delta - \epsilon)]^{\delta + \epsilon} e^y \\ = \exp(L - \delta - K t / f) \end{aligned} \quad (2.9)$$

を得る。

Youngs, Ligon 等の考えかたは、基本的に次の点で Darcy 式や浸潤式と共通点をもつ。まず、排水式が Darcy 式と同じ型であること。また、浸潤の式と類似の仮定があること。すなわち、①明瞭な後退線があり、②後退線には Capillary fringe の高さに相当する一定の負圧 - 後退毛管力 - が作用する、③比産出量は一定である、④排水中の透水係数は飽和透水係数に等しい、などである。

本論文では、これらの仮定に対して、まず後退線を定義し、後退毛管力を実測して、ある条件下では②の仮定が成り立たないことを実証し、③、④の仮定を実験的に検証する。

また、成層については、Bybord<sup>25)</sup>、Watson等<sup>26)</sup>の研究がある。これらの研究は、Youngs, Ligon 等と同じく、Darcy 型の排水式を適用している。また、排水式の仮定も同じである。

一方、不飽和領域と飽和領域の流れを連続した流れとして取り扱った研究には、Jackson等<sup>27)</sup>、Day等<sup>28)</sup>、Gardner<sup>29)</sup>、Watson<sup>30)</sup>、Zachmann等<sup>31)</sup>、Liakopoulos<sup>32)</sup>、Whisler等<sup>33)</sup>などの研究があ



る。

Jackson 等<sup>27)</sup>は、Youngs の式 - (2.5)式 - の  $\rho g r^2 / (8 \eta)$  , すなわち、Darcy 式の透水係数  $K$  が、排水中には未排水土壌柱の平均的な長さ  $z$  - 後退線の位置 - の関数であるとして、

$$K_e = \frac{L K_0 (z - h)^2}{(L - h)^3 + h (z - h)^2} \quad (2.10)$$

$K_e$  : 有効透水係数 [cm/s]

$K_0$  : 飽和透水係数 [cm/s]

$L$  : 土壌柱の長さ [cm]

$h$  : 土壌柱の air entry value (空気侵入値) [cmH<sub>2</sub>O]

$z$  : 未排水土壌柱の平均的な長さ [cm]

と置き、排水量と時間の関係を求めている。その結果、別に測定した  $h$  の値と関係なく、 $h/L = 0.95$  として求めた排水量と時間の関係が測定値とよく合うことを報告している。しかし、このことは、 $h/L$  が空気侵入値を土壌柱の長さで割った値ではなく、単なる実験定数としての意味しか持たないことを意味する。すなわち、排水現象の要因を明らかにしたことになる。

Day 等<sup>28)</sup>、Gardner<sup>29)</sup>、Watson<sup>30)</sup>、Zachmann 等<sup>31)</sup>、Liakopoulos<sup>32)</sup>、Whisler 等<sup>33)</sup>の研究は、不飽和浸透理論 - (2.2)式、(2.3)式 - を用いて、数値解析により、飽和浸透からの排水を明らかにしようとした研究である。これらの研究では、飽和領域のみを扱った研究に比べ、次のような長所と欠点を持つ。長所 - 飽和領域

のみを扱った研究では、得られる情報が、後退線の位置、排水量、時間の関係であるのに対し、不飽和領域をも扱った研究では、これらの情報に加えて、水分分布や土中水圧分布の時間的変化をも得ることができる。欠点－不飽和領域をも扱った研究では、あらかじめ、 $k - \theta$ あるいは $k - \psi$ の関係を実験で求めておかなければならず、また、(2.2)式、(2.3)式の計算がやっかいである。これに対し、飽和領域を扱った研究では、飽和透水係数、比産出量、Capillary fringe 高さあるいは限界負圧を実験で求めておけば、計算が非常に簡単である。

したがって、いずれの方法をとるかは、その目的によって選択する必要があろう。

本研究では、第 I 章で述べたように、畑作物の正常な生育に必要な空気間隙の確保という観点から、後退線の移動を把握することが目的である。したがって、式の取り扱いが簡単な、飽和領域のみを対象とした研究の方法を取ることにする。そこで、本論文では、排水式の仮定に対して、後退線を定義し、その定義のもとに後退毛管力を実測して、後退毛管力一定の仮定がある条件下のみに適用でき、他の条件の場合には適用できないことを実験的に示して、その区分条件を明らかにする。また比産出量一定、排水時透水係数が浸透時

透水係数に等しいという仮定の正当性を実験的に検証する。これらのことから、後退線の移動を明らかにする。

なお、本論文は次の様に構成されている。第Ⅲ章で後退線、後退毛管力の定義を行い、後退排水式の適用について述べてある。第Ⅳ章では、ガラスビーズ・砂の単層について、第Ⅴ章ではガラスビーズの2層の成層について、それぞれ排水実験を行い、後退毛管力、後退排水式について考察し、単層と成層の飽和状態からの排水について、それぞれまとめてある<sup>34,35)</sup>。第Ⅵ章では、関東ロームの充填土について実験を行い、第Ⅳ、Ⅴ章で得られた知見がこれらの土壌に対して適用できるかどうかを検討する。そして、第Ⅶ章で総括を行った。

### 第Ⅲ章 後退線と後退毛管力の定義および後退排水式の適用

#### 1. 後退線の定義

Lambe<sup>36)</sup>は、互いに横に連絡した2本の毛細管における排水（メニスカスの移動）について Poiseuille の式を用いて考察している。それによると、管径の等しい場合、両管のメニスカスは等しい高さを保持して降下する。これに対して、径の異なる2本の毛細管では、各管の流れに対する抵抗とメニスカスの毛管水頭が異なるために、各メニスカスの高さは異なってくる。すなわち、径の大きい管のメニスカスが径の小さい管のメニスカスよりさきに進む。この排水中の各管のメニスカスの位置関係や圧力水頭分布は、メニスカス間の動水勾配と管径とによって決まることを述べている。これは、ひとつひとつのメニスカスに着目したミクロ的な見方といえよう。

一方、粒子層の間隙は、仮に流れの方向の1本の間隙に着目したとすれば、等径の管ではなく種々の径が組み合わさった管と考えられる。このような間隙が多数あって、それらが互いに複雑に連絡している。したがって、排水過程での各間隙のメニスカスのつながりとして捕えられる面は平面でなく複雑な凹凸面と考えられ、その形は排水中絶えず変化していると推測される。それゆえに、実験的に

この面や個々のメニスカスを捕えることは難しい。そこで本研究では、最も進行したメニスカスに接し、流れの方向に対して垂直な断面を“後退線”と定義する。ただし、流れの断面全体を測定することはできないので、間隙分布が均一であると仮定して流れの断面の一部（受感部の部分）をもって代表させることにする。この後退線は、マクロに見れば、飽和部と不飽和部の境界を示すものと解釈される。後退線の測定方法については、第IV章 2.3)の実験方法の項で述べる。なお、後退線の移動現象と考えられる排水を、“後退排水”と呼ぶことにする。

## 2. 後退毛管力 $h_{dc}$ と後退毛管高 $h_c$ の定義

後退線の圧力水頭を“後退毛管力”とする。後退毛管力の測定方法については、第IV章 2.3)の実験方法の項で述べる。

また、後退線が試料層内に停止した時の、排水面から後退線までの高さを“後退毛管高”と定義する。ただし、この時の後退線の位置は実験用円筒内壁面上の飽和・不飽和帯の境界の観察と含水比測定で得た水分分布とから求めた平均値であって、さきに定義した後退線と厳密には異なる。ここで定義した後退毛管高は、Lambe<sup>36)</sup>の定義した Saturation Capillary head あるいは Childs<sup>37)</sup>の定義

した Capillary fringe 上の負圧, Hillel<sup>38)</sup>, Bouwer<sup>39)</sup> の定義する Air entry value (空気侵入値) に相当するものと考えられる。

### 3. 後退排水式の適用

後退排水について, Darcy 型の排水式 (以下, 後退排水式と呼ぶことにする) を適用することにする。なお, 圧力および位置エネルギーはすべて水頭表示 [cm] とする。単層における鉛直方向の後退排水式は,

$$q_d = K_d \frac{Y + h_{dc} - h_o}{Y}$$

$q_d$  : 排水強度 [cm/s]

$K_d$  : 後退排水時透水係数 [cm/s]

$h_{dc}$  : 後退毛管力 [cm]

$h_o$  : 試料層下端にかかる圧力水頭 [cm]

排水面を試料層下端より下に設けると  
負圧になる (Fig.4-3参照)

$Y$  : 後退線の位置 (試料層下端から後退線  
までの距離) [cm]

である。

成層の後退排水式については, 第 V 章で示す。

## 第IV章 ガラスビーズ・砂の単層における後退線の移動と後退排水式の検証

### 1. はじめに

この章では，後退排水の基本的な要因を明らかにするために，①第III章で定義した後退線と後退毛管力を実測し，②Darcy 型の後退排水式を適用して，①②の妥当性を検証する。そのなかで，③従来一定と仮定されていた後退毛管力が条件により変数になることを実験的に明らかにして，その実験式を提案する。

そのために，試料として，形状が球形に近く，粒径も比較的均一で，したがって間隙分布（間隙径，形状など）が一様と考えられるガラスビーズの単層と，ガラスビーズより形状および間隙分布は複雑であるが，土壌に比べれば単純であると考えられる豊浦標準砂の単層を実験に供した。

### 2. 後退排水実験

#### 1) 試料

用いた試料は，細粒ガラスビーズ（粒径 $0.25\sim 0.105\text{mm}$ ，真比重 $G_s=2.48$ ），粗粒ガラスビーズ（粒径 $0.50\sim 0.25\text{mm}$ ， $G_s=2.49$ ），豊浦標準砂（粒径 $0.42\sim 0.074\text{mm}$ ， $G_s=2.63$ ）である。また，エヤ

ーバインディングにより試料層の透水性低下がおきないように，脱気水を用いた<sup>40)</sup>。

## 2) 実験装置

後退排水実験円筒として，内径5cm，長さ100cmの透明アクリル円筒を用いた。なお，このような円筒を用いた透水実験での壁面の影響については，粒径と円筒の内径の比が100以上であることからここではそれを無視した<sup>41)</sup>。

圧力水頭，後退線の位置および後退毛管力を測定するために拡散形半導体圧力計（以下，単に圧力計と書く）— Photo 1 —を使用した。この圧力計は，感圧素子（拡散形半導体）に伝わった圧力を電気信号に変換するもので，その測定範囲は水頭表示で±100cm，精度±0.5cmである。受感部は，外径0.3cm，長さ約2cmのビニールパイプで，その側面に穴をあけ布でカバーし，気泡を入りやすくして後退線の通過を測定できるようにした。そのため，飽和状態では正圧から負圧まで測定可能であるが，開放不飽和状態（後退線の通過後）では，土中水の圧力水頭を測ることはできない。受感部の設置間隔は，試料層の厚さに応じて4～12cmとし，計7本設置した。この受感部と圧力計は水で連続させてある。圧力計による圧力水頭，後退線の位置，後退毛管力の測定例を Figs.4-1, 4-2 に示す。



排水量は、電子天秤ではかり、プリンターで一定時間ごとに記録

させた ( Photo 2 ) 。精度は $10^{-4}$ kgである。

実験装置の概要を Fig.4-3 に示す ( Photo 1, 2, 3 )。

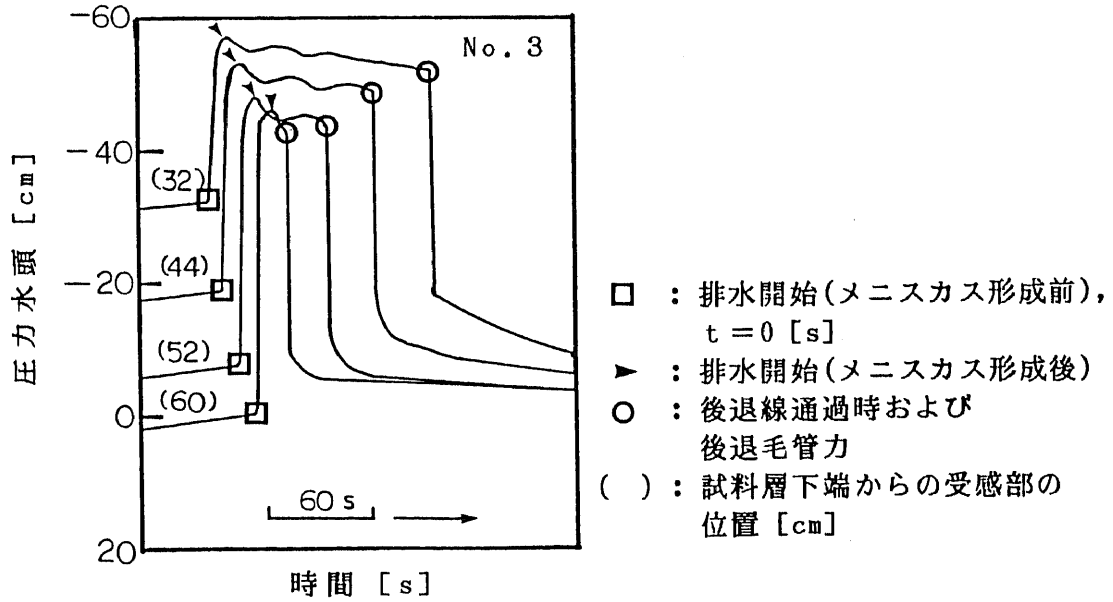


Fig.4-1 圧力計による後退排水開始, 後退線の位置および後退毛管力の測定例 (No.3:Table4.1を参照)

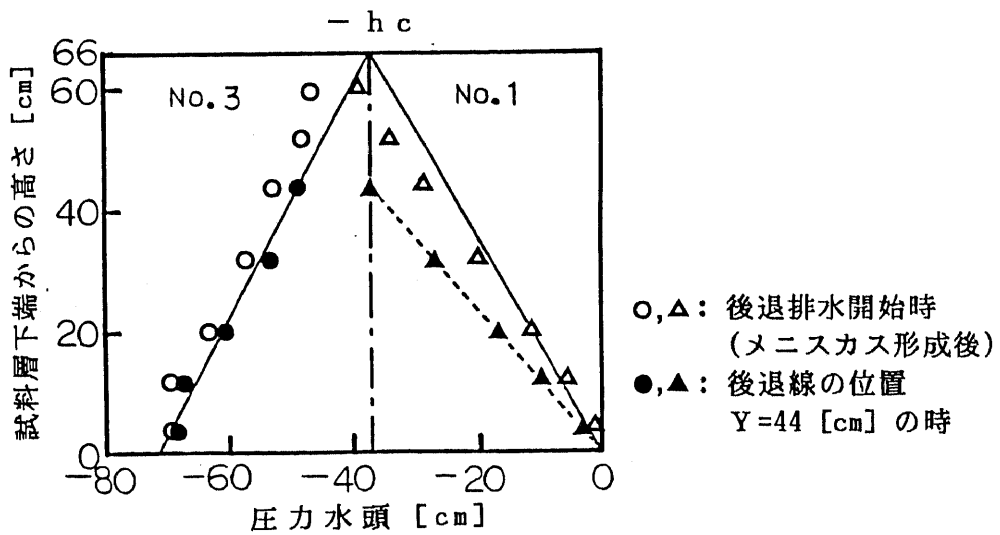


Fig.4-2 後退排水中における後退線から下の圧力水頭分布例 (No.1, No.3:Table4.1参照)

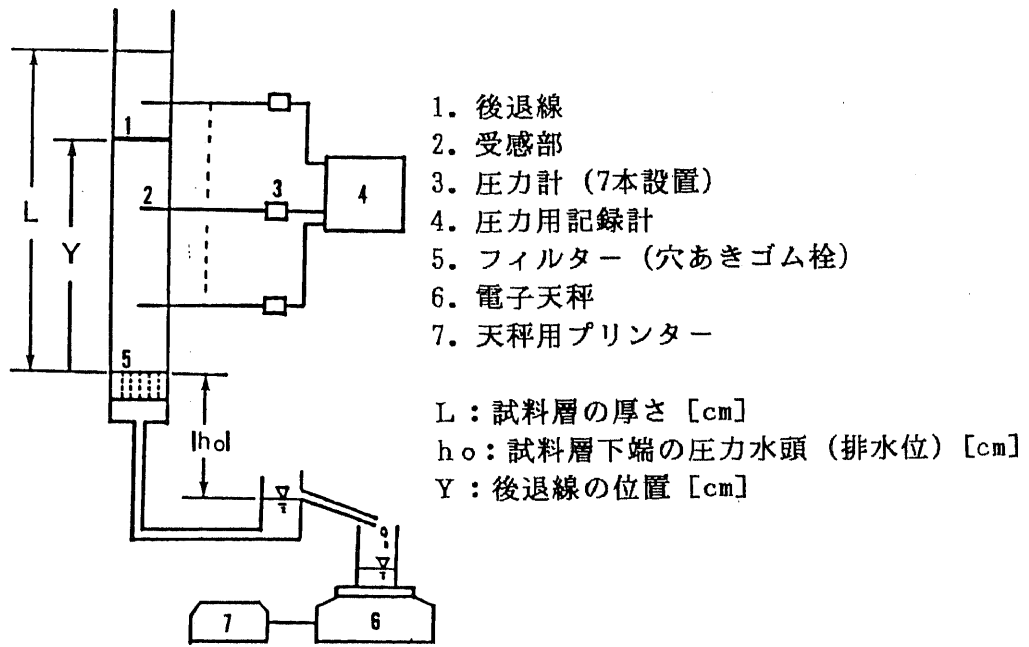


Fig.4-3 実験装置概要

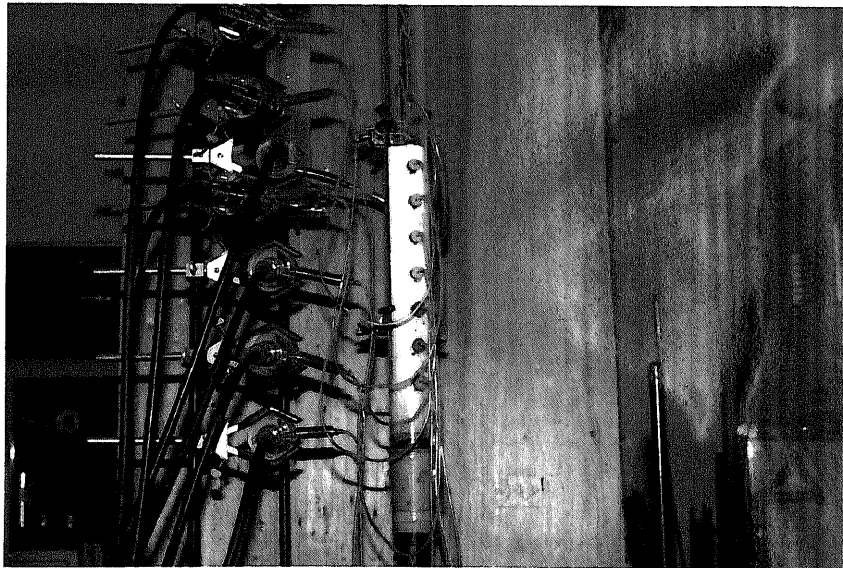


Photo 1 圧力計および試料層

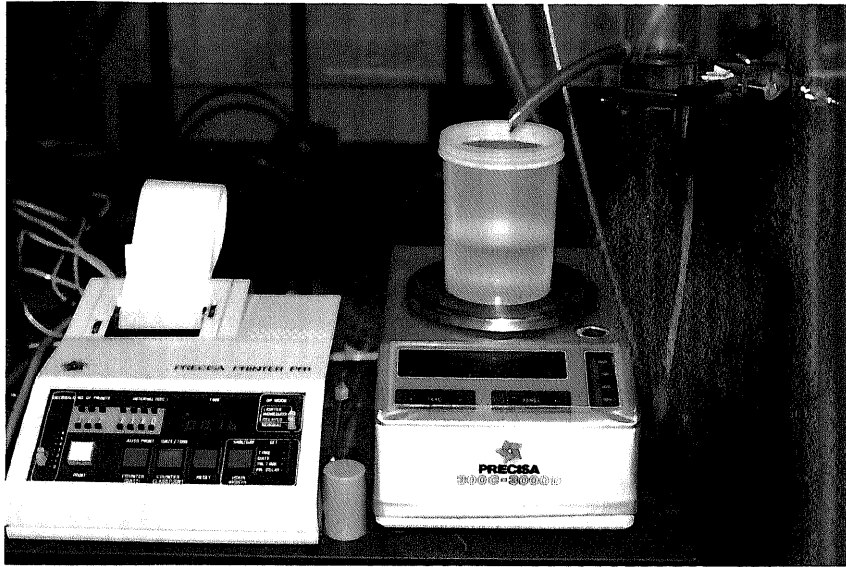


Photo 2 排水量測定装置

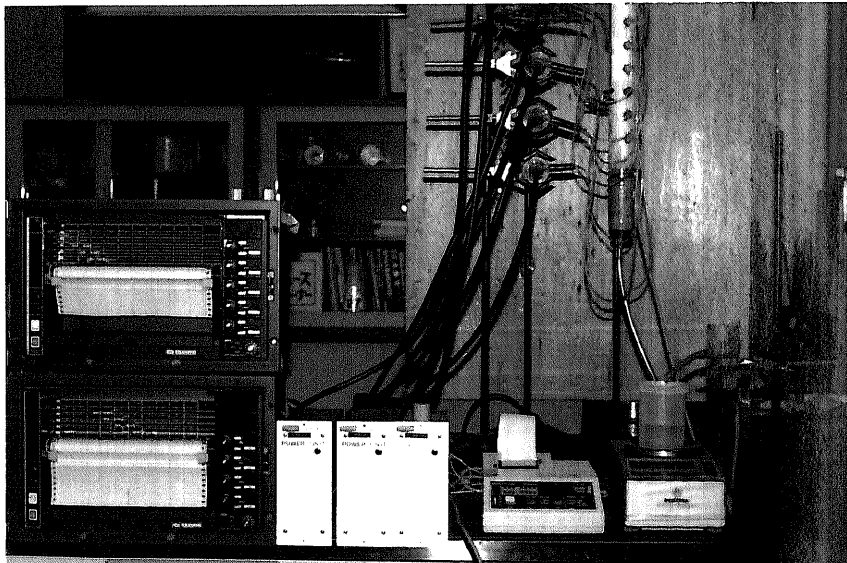


Photo 3 実験装置全景

### 3) 実験方法

#### (1) 試料層の作製

後退排水実験円筒に受感部を差し込んでから、単位体積重量が一定になるよう乾燥試料を充填し、試料層下端から脱気水を供給して、湛水状態にした。

#### (2) 測定

①浸透時透水係数：試料層の作製後、定水位透水試験を行い<sup>42)</sup>、浸透時透水係数を求めた。この時、圧力水頭を圧力計で測り、充填むらがないことを確認した。単層であるから、圧力水頭の分布は深さに対して直線関係になる<sup>43)</sup>。なお、本論文では第Ⅱ章 1. で述べたように、閉鎖不飽和も含めて飽和状態としたので、飽和透水係数という用語は用いず、浸透時の透水係数という意味で“浸透時透水係数”という用語を用いた。

②後退排水開始：浸透時透水係数を測定後、水の供給を停止し、湛水消失時を後退排水開始とした。この時、経過時間  $t = 0$  [s]、積算排水量  $Q = 0$  [cm<sup>3</sup>] とした。湛水消失の瞬間、全位置の圧力水頭は急激に低下するので、後退排水開始は明瞭に知ることができる ( Fig.4-1参照 ) 。

③排水強度  $q_d$  [cm/s] : 次式で求めた。

$$q_d = \frac{\Delta Q}{A \cdot \Delta t} \quad (4.1)$$

A : 試料層断面積 [cm<sup>2</sup>]

$\Delta t$  : 時間 [s]

$\Delta Q$  :  $\Delta t$  [s] 間に排水される水量 [cm<sup>3</sup>]

④後退線の位置 Y [cm] : 後退線通過直後, その位置の受感部には空気が侵入するため, 圧力水頭は急激な変化を示す ( Fig.4-1参照 )。用いた試料では, 負圧からほぼ大気圧に急激に変化した。したがって, その受感部の位置を後退線が通過したと見なすことができる。同時に時間 t と積算排水量 Q を測定した。後退線の位置は, 試料層下端から後退線までの距離として表した。

⑤後退毛管力  $h_{dc}$  [cm] : 上述したように, 後退線通過時に圧力水頭は急激に変化し, その直前の圧力水頭の値は後退線の圧力とみなすことができる ( Fig.4-1参照 )。この値を後退毛管力とする。

⑥実験中の水温変化は  $\pm 1^\circ\text{C}$  以内であった。

また, 後退排水実験時と同じ乾燥密度になるように各試料を 100 cm<sup>3</sup> サンプラに充填して, 水頭差型 pF 試験器で限界負圧 ( 空気侵入値 )  $h_a$  を測定した ( Table 4.2 )。

(3) 実験条件

本章で直接用いた実験の条件を Table 4.1 に示す。以後実験No.と書く場合、この表の実験No.を示す。

Table 4.1 実験条件

実験No.	試料	試料厚 L [cm]	排水位 $h_0$ [cm]	透水係数 [cm/s]		水温 T [°C]
				浸透時 $K_p$	排水時 $K_d$	
1	細粒	66	0	$8.9 \times 10^{-3}$	$9.7 \times 10^{-3}$	18
2		66	-26	$9.5 \times 10^{-3}$	$9.1 \times 10^{-3}$	19
3		66	-71	$9.3 \times 10^{-3}$	$9.2 \times 10^{-3}$	19
4		52.5	-60	$2.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$	26
5		52.5	-71	$1.3 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$	28
6	粗粒	40	-13	$6.3 \times 10^{-2}$	$6.4 \times 10^{-2}$	22
7		40	-35	$7.3 \times 10^{-2}$	$7.3 \times 10^{-2}$	22
8	豊浦標準砂	73	-32	$1.5 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$	27
9		73	-81	$1.4 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$	24
10	細粒	80	-76	$1.3 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$	23

\* 細粒：粒径0.25~0.105mmガラスビーズ，粗粒：粒径0.50~0.25mmガラスビーズ

\* 充填仮比重：細粒 1.57，粗粒 1.57，豊浦標準砂 1.61 [g/cm<sup>3</sup>]

\*  $K_p$ ,  $K_d$ ：T°Cにおける透水係数，

$K_p$ は測定値， $K_d$ は(4.6)式または(4.10)式から求めた計算値

\* 実験No. 1~9：鉛直方向の後退排水実験， 実験No.10：水平方向の後退排水実験

### 3. 実験結果と考察

次の順に考察を加える。(i) 定義した後退線および後退毛管力に対する後退排水式の適用の妥当性を検討する。(ii) 後退毛管力について若干の検討を行い、(iii) 後退線の位置と時間の関係を求める。

#### 1) 実験から得た $q_d \cdot Y$ と $Y$ の関係

後退排水式 - 第Ⅲ章 3. 参照 - ,

$$q_d = K_d \frac{Y + h_{dc} - h_o}{Y} \quad (4.2)$$

$q_d$  : 排水強度 [cm/s]

$K_d$  : 後退排水時透水係数 [cm/s]

$h_{dc}$  : 後退毛管力 [cm]

$h_o$  : 試料層下端の圧力水頭 [cm]

$Y$  : 後退線の位置 (試料層下端から後退線までの距離) [cm]

を浸潤直線式<sup>20)</sup>にならって変形すると,

$$q_d \cdot Y = K_d \cdot Y + K_d(h_{dc} - h_o) \quad (4.3)$$

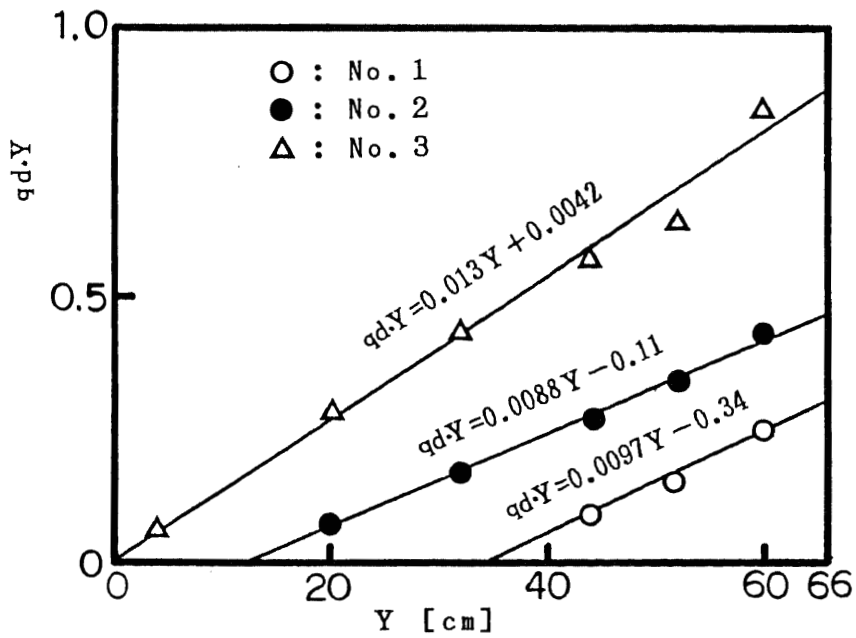
となる。一方、実験で得た  $q_d$  と  $Y$  の値から  $q_d \cdot Y$  と  $Y$  の関係を求めると、Fig.4-4(a) に示すように直線関係になる。この関係は、細粒ガラスビーズの他の実験条件においても、また粗粒ガラスビーズ、豊浦標準砂においても同様に直線関係になる - Fig.4-4(b), (c) -。後の考察のために、実験で得た  $q_d \cdot Y$  と  $Y$  の関係を回帰直

線式で表すことにする。

$$q d \cdot Y = a Y + b \quad (4.4)$$

a, b : 定数

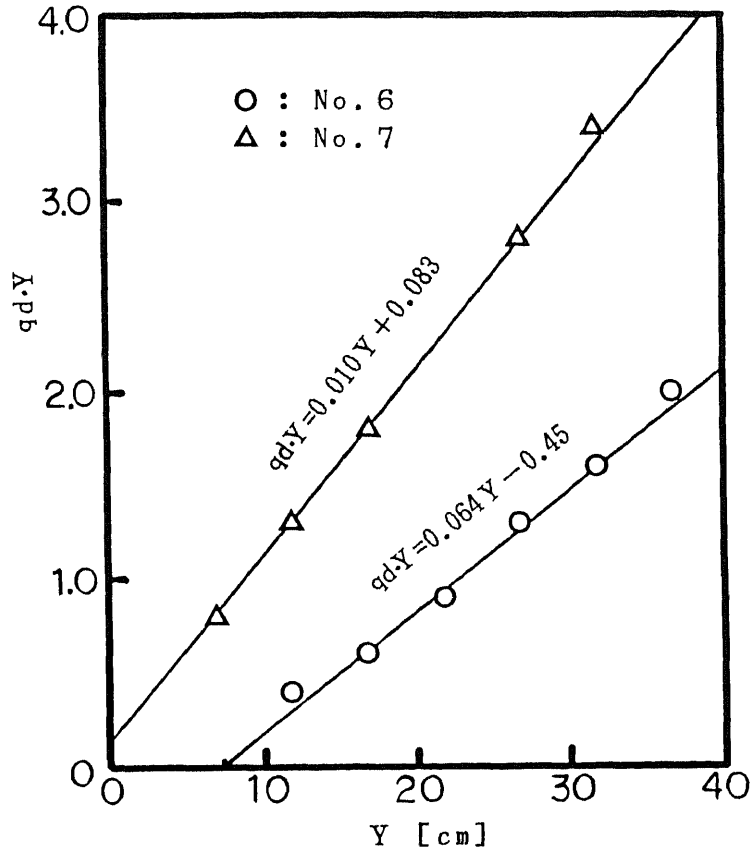
なお後退線の移動時に、圧力計で求めた後退線の位置 Y と実験円筒壁面上で観察される Y とはほぼ一致した。ただし、豊浦標準砂では、肉眼で後退線の位置を識別することができなかった。



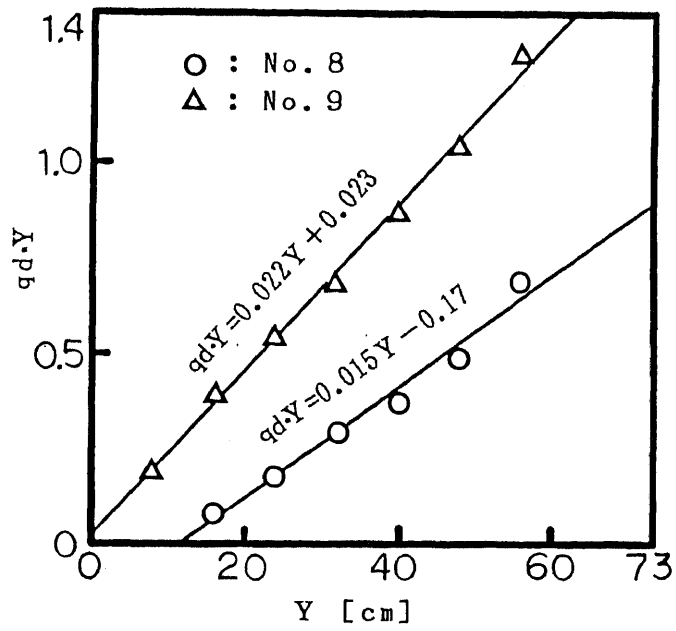
(a) 細粒ガラスビーズ

Fig.4-4  $q d \cdot Y$  と Y の関係





(b) 粗粒ガラスビーズ



(c) 豊浦標準砂

Fig.4-4  $q_d \cdot Y$  と  $Y$  の関係

## 2) 後退毛管力 $h_{dc}$ の実測値

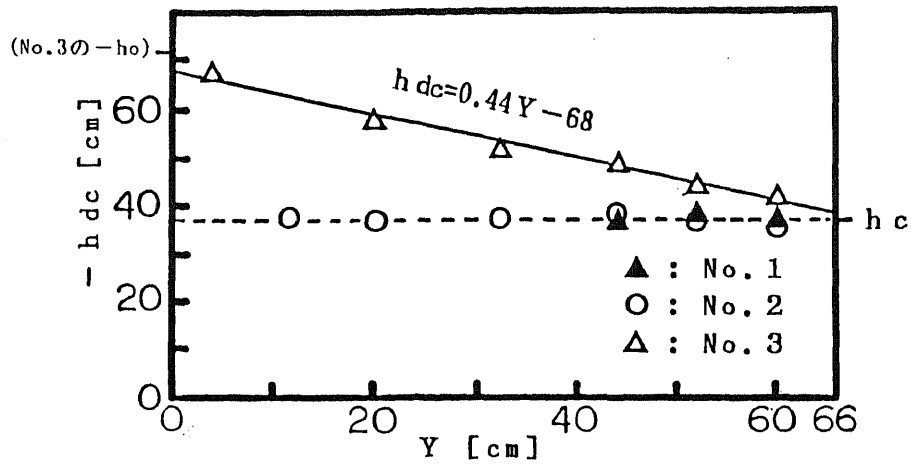
圧力計で測定した  $h_{dc}$  と後退線の位置  $Y$  との関係を, Fig.4-5(a) に示す。 $h_{dc}$  は, 実験No.1, No.2 では後退排水中一定とみなせる。それに対して実験No.3 では,  $h_{dc}$  は  $Y$  に対して直線的に変化し一定でない。 $h_{dc}$  が一定であったり, 変化するという現象は, 細粒ガラスビーズだけでなく, 粗粒ガラスビーズ, 豊浦標準砂でもみられる—Figs.4-5 (b), (c)—。

実験によると,  $h_{dc}$  が一定である場合は後退線が試料層内に停止する時であり, 変化する場合は後退線が試料層内に停止せず通過してしまう時である。この現象は, 次のように式で表すことができる。すなわち, 前述した後退毛管高  $h_c$  の定義から,

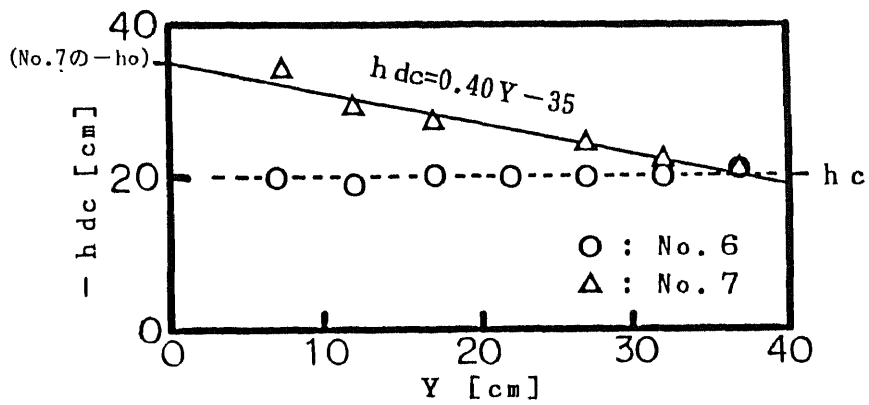
$$h_c = Y_s - h_o \quad (4.5)$$

$Y_s$ : 後退線の停止位置 [cm]

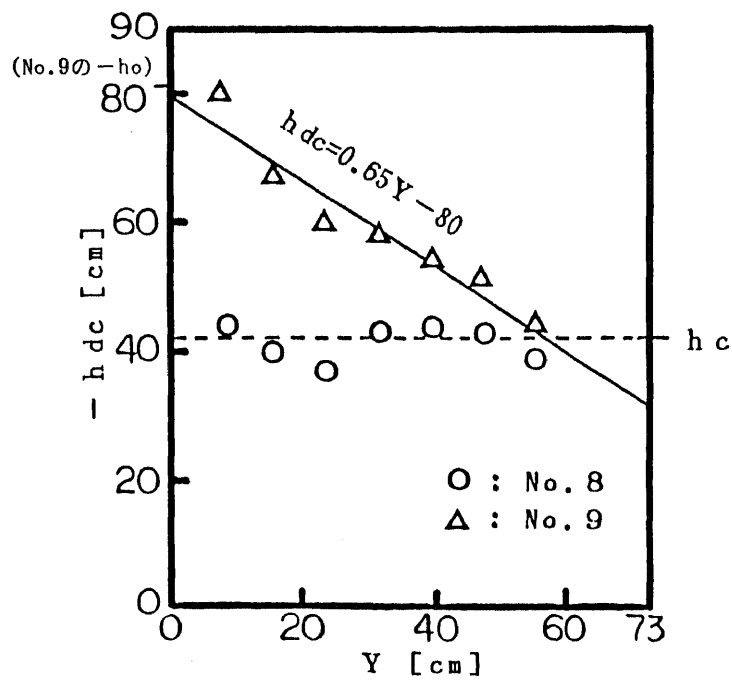
が成立する。(4.5)式から,  $-h_o \leq h_c$  の時,  $Y_s \geq 0$  であるから, 後退線は試料層内に停止する。 $-h_o > h_c$  の時,  $Y_s < 0$  となり, 後退線は試料層内に停止せず試料層下端を通過する。このように, 実験結果から分類すると, 後退毛管力  $h_{dc}$  は,  $-h_o \leq h_c$  の時に一定であり,  $-h_o > h_c$  の時に変化すると考えられる。



(a) 細粒ガラスビーズ



(b) 粗粒ガラスビーズ



(c) 豊浦標準砂

Fig.4-5 後退線の各位置Yにおける後退毛管力  $h_{dc}$

### 3) 積算排水量 $Q$ と後退線の位置 $Y$ との関係

それぞれの試料について一例ずつ、 $Q$  と  $Y$  の関係を、Fig.4-6 に示す。 $Q$  と  $Y$  の関係は、それぞれ実験条件によってその勾配を異にするものの、すべて直線関係にあるとみることができる。これは、比産出量（単位体積から排水される水量）が、 $Y$  に関係なく一定であることを示している。このことから、排水に係わる間隙は深さ方向に一定であり、また後退排水時透水係数  $K_d$  は、 $Y$  に関して後退排水中一定と推定される。

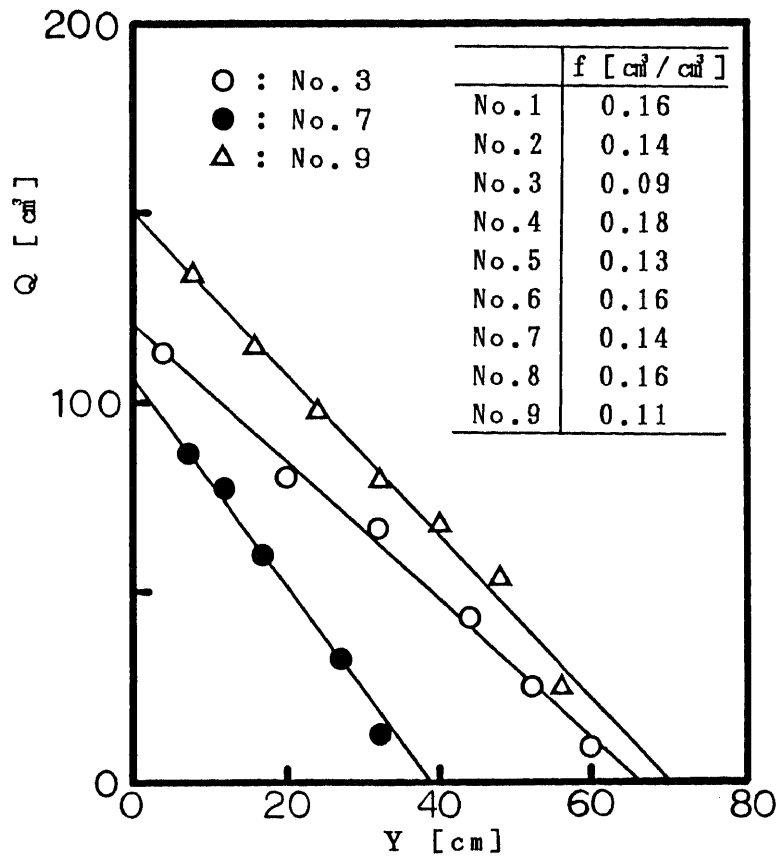


Fig.4-6 積算排水量  $Q$  と後退線の位置  $Y$  の関係  
および各実験の比産出量  $f$  の値

#### 4) 後退排水式適用の検討

ここでは第IV章 3. 1)~3) の考察から、後退排水式の検討を行うが、第IV章 3. 2) に示したように、後退毛管力が一定の場合と変化する場合があるので、これらを別々に検討する。

##### (1) 後退毛管力 $h_{dc}$ が一定である場合

(4.2)式が適用できるとすれば、Darcy式に由来する(4.3)式と回帰直線式の(4.4)式とを対応させると、(4.6)、(4.7)式となる。

$$K_d = a \quad (4.6)$$

$$K_d(h_{dc} - h_o) = b \quad (4.7)$$

(4.6)式と(4.7)式が成立すれば、(4.2)式は後退排水現象に適用できると考えられる。そこで、 $h_{dc}$ の測定値と(4.7)式から計算した $h_{dc}$ との比較を行うことによって、(4.6)式と(4.7)式が成立することを検証する。

(4.6)式から、 $K_d$ は一定でなければならない。これは、 $Q$ と $Y$ が直線関係にあること—第IV章 3. 3) 参照—から裏付けられる。

次に、(4.4)式の $b$ と(4.6)式で得た $K_d$ を(4.7)式に代入して $h_{dc}$ を求めると、Table 4.2 に示すように、圧力計で測った $h_{dc}$ の平均値とほぼ一致する。さらに同表に示すように、 $h_{dc} = -h_c = -h_a$ がほぼ成立する。これは、この時の $h_{dc}$ が間隙径を反映する毛管力

であることを示していると思われる。

なお、(4.6)式で得た $K_d$ は、Table 4.1 の実験No.1, No.2, No.6, No.8 に示すように浸透時透水係数 $K_p$ とほぼ等しい。このことから、後退排水時の有効間隙は浸透時と同じと考えられる。

このように、 $h_{dc}$ が一定の場合、(4.2)式の後退排水式は適用でき、後退線の定義と後退毛管力の測定値は有効である。

Table 4.2 後退毛管力および他の毛管力

試料	後退毛管力 $h_{dc}$ [cm]		後退毛管高 $h_c$ [cm]		限界負圧
	実測平均値	(4.7)式の計算値	観察値	水分分布値	$h_a$ [cm]
細粒	-38	-37	36~38	36~38	36~38
粗粒	-20	-20	14~20	15~17	18~20
豊浦標準砂	-43	-43	40~45	40~42	36~38

\* 後退毛管高：同一試料でも各試料層のつまり具合によって若干異なる。この表の値はそれらの値を全て示すために幅をもたせて表示した。計算では観察値と水分分布値とがほぼ一致することから各試料層に対して観察で求めた $h_c$ を用い、その値は Fig.4-10 の図中に示した。

## (2) 後退毛管力 $h_{dc}$ が変化する場合

実験で得た  $q_d \cdot Y$  と  $Y$  の関係が Fig.4-4 の実験No.3, No.7, No.9 に示すように直線関係—(4.4)式—になることから、(4.2)式の後退排水式が適用できるとすれば、(4.2)式を変形した(4.3)式と(4.4)

式とを対応させると、 $K_d$ は一定であり、変化する場合の $h_{dc}$ は $Y$ に関して直線関係にならなければならない。すなわち、

$$h_{dc} = \alpha Y + \beta \quad (4.8)$$

$\alpha, \beta$  : 定数

一方、実測による $h_{dc}$ と $Y$ の関係は、Fig.4-5の実験No.3, No.7, No.9に示す通り、これも(4.8)式で表すことができる。したがって、(4.8)式を(4.3)式に代入して整理すると、

$$q_d \cdot Y = K_d(1 + \alpha)Y + K_d(\beta - h_o) \quad (4.9)$$

(4.4)式と(4.9)式とから、

$$K_d(1 + \alpha) = a \quad (4.10)$$

$$K_d(\beta - h_o) = b \quad (4.11)$$

が得られる。

そこで、(4.2)式が適用できるかどうかを判定するために、(4.10)式、(4.11)式が成立するかどうかを検討する。

まず、実験で得た $a$ と $\alpha$ を(4.10)式に代入して $K_d$ を求める。次に、この(4.10)式で求めた $K_d$ と実験で得た $b$ および実験条件として与えた $h_o$ を(4.11)式に代入して $\beta$ を求め、これを逆算値 $\beta'$ とする。この $\beta'$ と、 $h_{dc}$ と $Y$ の測定値から回帰直線式を求めて得た $\beta_{exp}$ との比較を行う。これらの値が一致すれば、(4.10)式、(4.11)式は成立すると考えてよい。このようにして求めた逆算値 $\beta'$ と実

験値  $\beta_{exp}$  とを Table 4.3 に示す。両者はよく一致しているといえよう。したがって、(4.10)式、(4.11)式は成立する。

なお、(4.10)式で求めた  $K_d$  は、Table 4.1 の実験No.3~5, No.7, No.9 に示すように、浸透時透水係数とほぼ等しい。

以上のことから、 $h_{dc}$  が変化する場合も、後退線および後退毛管力の定義とその適用は有効なものであり、(4.2)式は適用できると結論される。この時、 $h_{dc}$  は(4.8)式で表され、 $K_d$  は後退排水中一定である。

Table 4.3  $\beta$  の逆算値と実験値 [cm]

実験No.	試料	逆算値 $\beta'$	実験値 $\beta_{exp}$
3		-70	-68
4	細粒	-63	-64
5		-66	-70
7	粗粒	-34	-35
9	豊浦標準砂	-79	-80
10	細粒	-72	-70

\* 実験No.3~9: 鉛直方向の後退排水実験

\* 実験No.10 : 水平方向の後退排水実験

\* 逆算値  $\beta'$  : (4.10)式から求めた  $K_d$  と実験で得た  $b$  を(4.11)式に代入して求めた  $\beta$  の値。



## 5) 後退毛管力 $h_{dc}$ の検討

### (1) $h_{dc}$ が一定の場合と変化する場合の区分条件

第IV章 3.2) で、 $-h_o \leq h_c$  の時  $h_{dc}$  は一定であり、 $-h_o > h_c$  の時  $h_{dc}$  は変化することを実験の観察から述べた。このことは、 $h_o$  と  $h_c$  が  $h_{dc}$  を決める要因であることを示している。しかし、 $h_o$  と  $h_c$  の関係ではなく、排水強度  $q_d$  に関連する可能性も考えられる。すなわち、 $-h_o$  が大きくなれば、(4.2)式からわかるように、 $q_d$  も大きくなる。したがって、 $-h_o$  と  $h_c$  の大小関係は  $q_d$  の大きさに置き換えることができる。ここでは、(4.2)式を、

$$q_d/K_d = 1 + \frac{h_{dc} - h_o}{Y}$$

と変形して、 $q_d/K_d$  の大きさを考察してみる。

$-h_o \leq h_c$  の時、 $h_{dc} = -h_c$  であるから、 $h_{dc} - h_o \leq 0$  となり、 $q_d/K_d \leq 1$  となる。これに対して、 $-h_o > h_c$  の時、Fig. 4-5 (a) の実験No.3 にみるように、後退排水中では  $h_{dc} > h_o$  が成立する。したがって、 $h_{dc} - h_o > 0$  であるから、 $q_d/K_d > 1$  となる。整理すると、鉛直方向の後退排水では、

$$-h_o \leq h_c \text{ という条件は、 } q_d/K_d \leq 1$$

$$-h_o > h_c \text{ という条件は、 } q_d/K_d > 1$$

にそれぞれ置き換えることができる。

ゆえに、鉛直方向の後退排水実験では、後退毛管力を区分する条件が  $q_d/K_d$  によるのか、 $h_o$ と $h_c$ の関係によるのかは決められない。そこで後退毛管力の区分条件がどちらであるかを、水平方向の後退排水実験で検討する。

すなわち、水平方向の後退排水式は、

$$q_d = K_d \frac{h_{dc} - h_o}{Y} \quad (4.12)$$

と表され、変形すると、

$$q_d/K_d = \frac{h_{dc} - h_o}{Y}$$

となるので、次のように考えられる。

① 水平方向の場合、 $-h_o > h_c$  でなければ後退排水は起こり得ない。それゆえに、 $-h_o$ と $h_c$ の大小関係が後退毛管力の変化の有無の区分条件であれば、後退毛管力は排水区間の全領域で変化する。

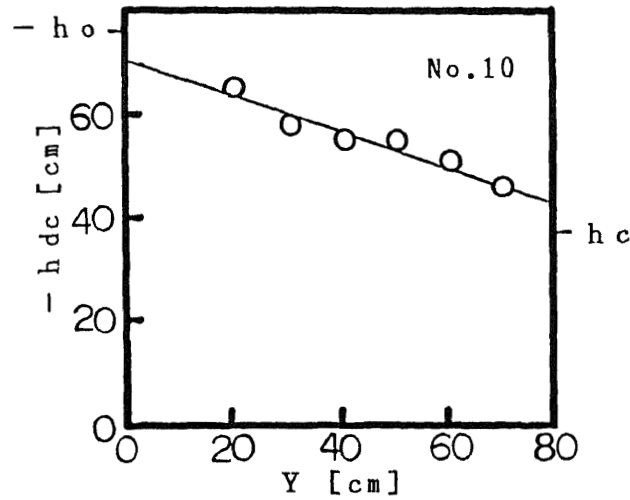
②  $q_d/K_d$  の大きさが区分条件であれば、たとえば実験No.10では、Table 4.1 に示す条件と Table 4.2 から、 $h_o = -76$  [cm]、 $h_c = 37$  [cm] であるから、 $h_{dc} = -h_c$  とすると、 $h_{dc} - h_o = -h_c - h_o = 39$  [cm] になる。したがって、 $Y$  が  $80 \sim 39$  cmでは、 $(-h_c - h_o)/Y \leq 1$ 、すなわち  $q_d/K_d \leq 1$  となるから、この $Y$ の領域では後退毛管力は一定と考えられる。 $Y < 39$  [cm] になると、 $q_d/K_d > 1$  となって、後退毛管力は変化すると考えられる。

①，②のどちらが正しいのかを確認するために実験を行った。試料は，細粒ガラスビーズである。これを長さ80cm，高さ1.5cm，幅5cmの直方体透明塩ビ試験筒に，単位体積重量が鉛直方向実験での試料層と同じになるように充填した。試験筒上面に10cm間隔にあけた穴にあらかじめ受感部を差し込んでおく。なお，排水位  $h_o$  は，試験筒の高さの1/2 から排水面までの距離を測って求め，試料層の厚さ 1.5 cmによる上部と下部との位置水頭差は， $h_o = -76$  [cm] に比べ小さいと考え，無視した<sup>44)</sup>。その他は鉛直方向の後退排水実験と同じとした。また，実験結果も鉛直方向の後退排水実験と同様に整理し， $K_d$ は Table 4.1 の実験No.10 に示すように浸透時透水係数とほぼ等しく，(4.12)式は適用できることを確認した。そこで，測定した後退排水中の後退毛管力を検討すると，Fig.4-7 に示す通り，後退毛管力は全領域で変化するとみることができ，①の推測が正しく，②の推測は間違いであることがわかる。したがって，後退毛管力の区分条件は， $q_d/K_d$ ではなく， $-h_o$ と  $h_c$ の大小関係であると結論される。すなわち，

$$-h_o \leq h_c \text{ のとき， } h_{dc} = -h_c \quad (\text{一定}) \quad (4.13)$$

$$-h_o > h_c \text{ のとき， } h_{dc} = \alpha Y + \beta \quad (\text{変数}) \quad (4.14)$$

である。



水平方向の後退排水実験 (No.10)

Fig.4-7 後退線の各位置Yにおける後退毛管力  $h_{dc}$

(2) 変化する場合の後退毛管力  $h_{dc}$  を求める実験式

(4.8)式の  $\alpha$ ,  $\beta$  がどのような値をとるかを検討する。 Fig.4-5 の実験No.3, No.7, No.9 に示すように, 試料や実験条件にかかわらず,  $h_{dc}$  の変化は① Y に関して直線関係にある。その直線を延長すると, ②  $Y = L$  で,  $h_{dc} \approx -h_c$ , ③  $Y = 0$  で,  $h_{dc} \approx h_o$  となる。そこで, ②, ③ から,  $Y = L$  で  $h_{dc} = -h_c$ ,  $Y = 0$  で  $h_{dc} = h_o$  とすると, ① から,

$$\alpha = - (h_o + h_c) / L \quad (4.15)$$

$$\beta = h_o \quad (4.16)$$

と表すことができる。

$h_{dc}$  の測定値から得た  $\alpha_{exp}$ ,  $\beta_{exp}$  とそれぞれ (4.15) 式から求め

た  $\alpha_{cal}$  および (4.16) 式から求めた  $\beta_{cal}$  との比較を, Figs.4-8, 4-9 に示す。  $\alpha_{exp}/\alpha_{cal}$ ,  $\beta_{exp}/\beta_{cal}$  の基準値を 1 とした時の標準偏差は, それぞれ 0.31, 0.07 であり, 多少のパラツキはあるものの, ほぼ一致するとみることができよう。このことから,  $\alpha$ ,  $\beta$  は近似的に (4.15) 式, (4.16) 式で求めることができる。

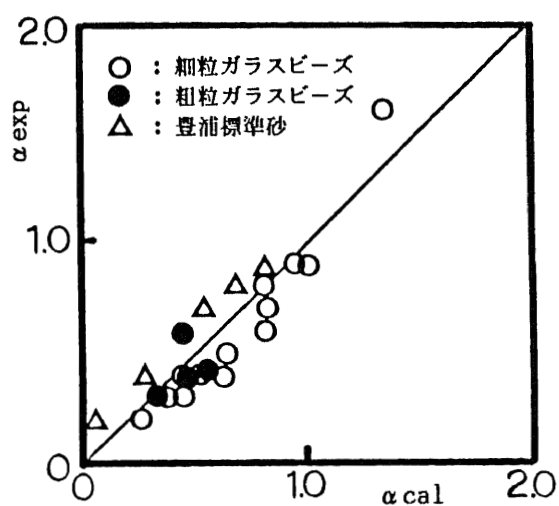


Fig.4-8 計算値  $\alpha_{cal}$  と実験値  $\alpha_{exp}$  の比較

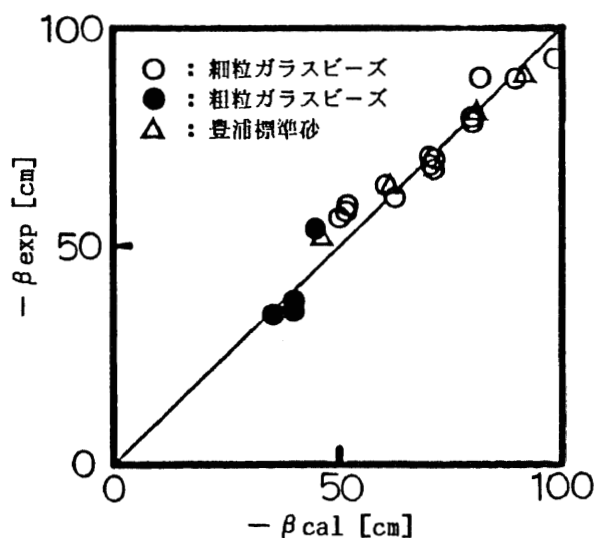


Fig.4-9 計算値  $\beta_{cal}$  と実験値  $\beta_{exp}$  の比較

6) 後退線の位置 Y と時間 t の関係

Y と t の関係を求める。Fig.4-6 に示すように、

$$\frac{dQ}{dY} = -A \cdot f \quad (4.17)$$

ただし、A : 試料層断面積 [cm<sup>2</sup>]

f : 比産出量(定数) [cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>]

と表すことができる。(4.1)式、(4.2)式、(4.8)式、(4.17)式から、

$$t = \frac{f}{(1+\alpha)^2 K_d} \left\{ (1+\alpha)(L-Y) + (\beta - h_0) \ln \frac{(1+\alpha)Y + \beta - h_0}{(1+\alpha)L + \beta - h_0} \right\} \quad (4.18)$$

ただし、 $-h_0 \leq h_c$  の時、 $\alpha = 0$ 、 $\beta = -h_c$ 。

また、 $-h_0 > h_c$  の時、 $\alpha$ 、 $\beta$  をそれぞれ(4.15)式、(4.16)式

で求めて、Y と t の関係式を導くと、

$$t = \frac{f L}{K_d(L - h_c - h_0)} (L - Y) \quad (4.19)$$

となる。

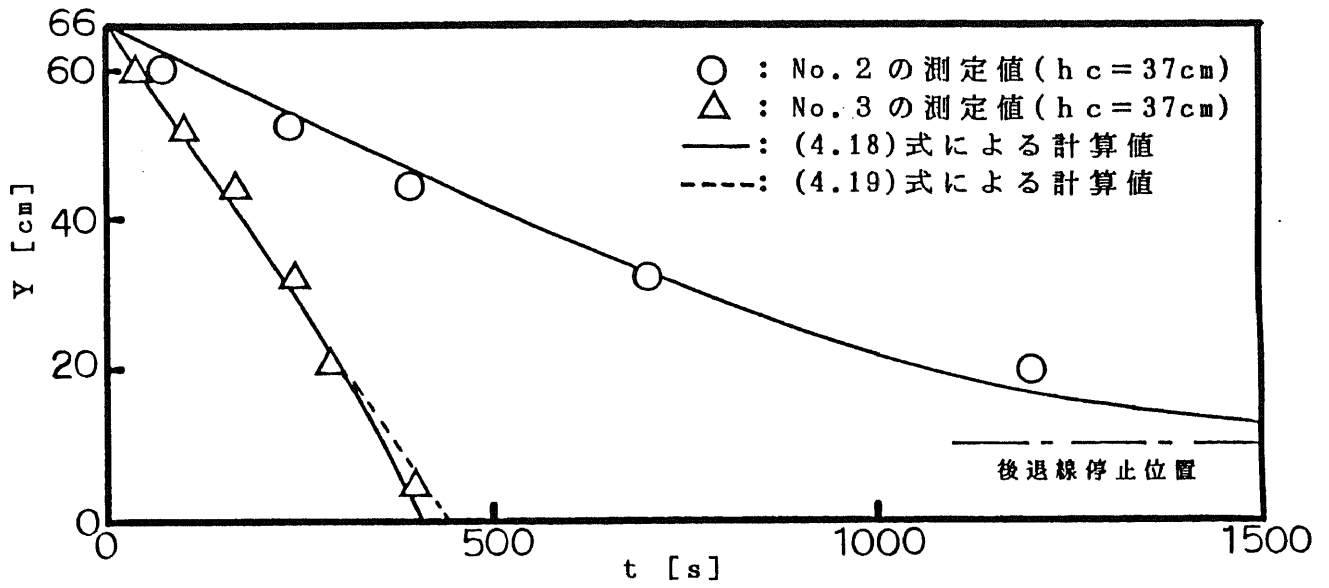
実験結果の例を各試料についてそれぞれ、Fig.4-10 (a), (b),

(c) に示す。測定値と計算値はよく一致する。なお、実験No.3, No.

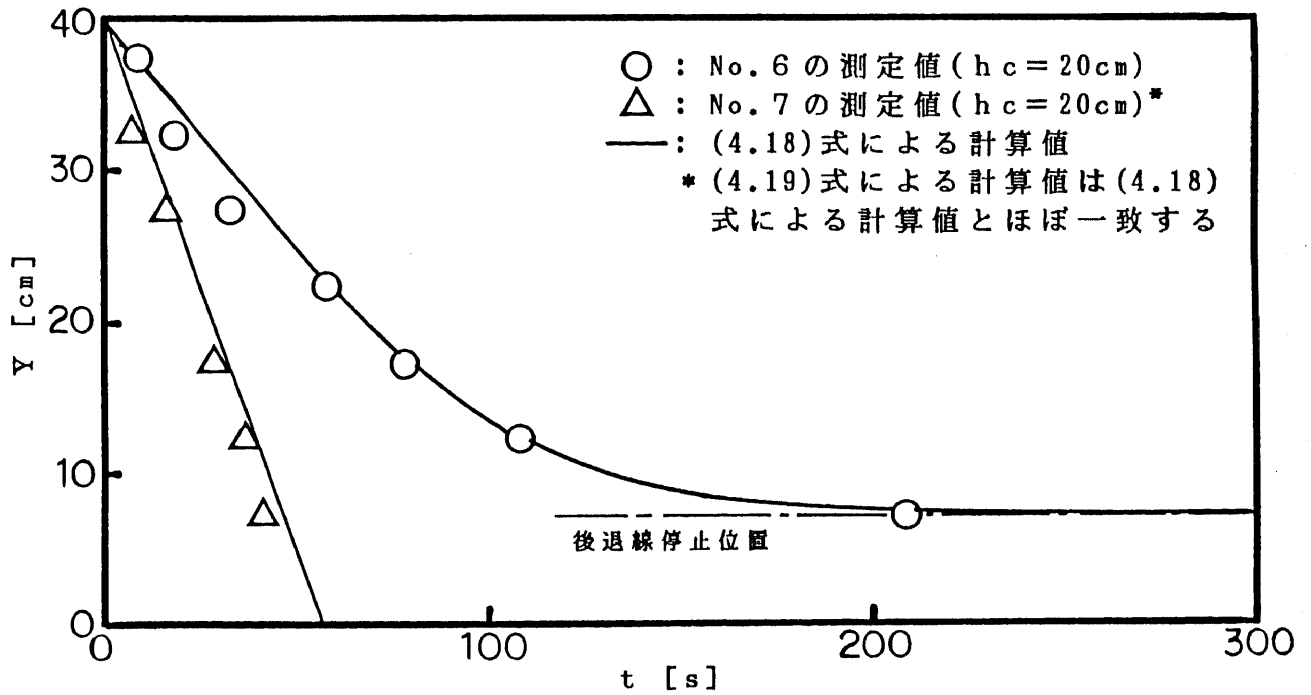
7, No.9 の(4.18)式による計算では、 $\alpha$ 、 $\beta$  はそれぞれ  $\alpha_{exp}$ 、

$\beta_{exp}$  を用いた。また、 $K_d$  のかわりに浸透時透水係数  $K_p$  を用いた。

比産出量 f の値は Fig.4-6 を参照されたい。



(a) 細粒ガラスビーズ



(b) 粗粒ガラスビーズ

Fig.4-10 後退線の各位置 Y における時間 t

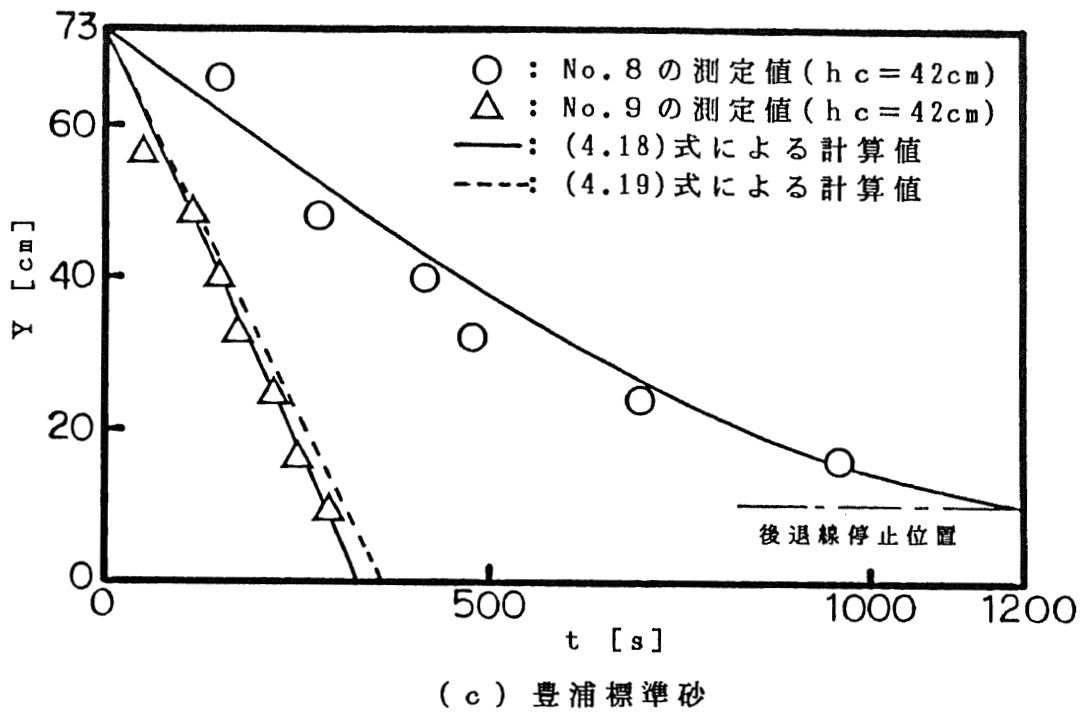


Fig.4-10 後退線の各位置 Y における時間 t

#### 4. まとめ

空気間隙の確保という観点から後退線を定義し、その移動現象を把握するために、単層における後退排水実験を行った。結果は次の通りである。

① 後退線および後退毛管力の定義とその測定方法は有効なものと考えられる。

② 後退排水式として(4.2)式が適用できる。

③ 従来一定と仮定されていた後退毛管力  $h_{dc}$  は、排水位  $h_o$  と後退毛管高  $h_c$  との関係で、



-  $h_o \leq h_c$  の時,  $h_{dc} = -h_c$  (一定)

-  $h_o > h_c$  の時,  $h_{dc} = \alpha Y + \beta$  (変数)

と区分することができ, 実験的に  $\alpha$ ,  $\beta$  は, それぞれ(4.15)式, (4.16)式で求められる。また, 後退毛管力は排水強度(速度)に影響されないことが明らかになった。

④ 後退排水時透水係数は浸透時透水係数と等しく, 後退排水中一定である。

⑤ 比産出量(単位体積当りからの排水量)  $f$  は深さにかかわらず一定である。

なお, ③の区分条件は単層の時であり, 成層の場合は, 層の境界の圧力水頭の値で異なってくると考えられる。したがって, 一般的な区分条件については, 成層の後退排水実験後に行うことにする。

## 第 V 章 ガラスビーズの成層における後退線の移動と後退排水式の検証

### 1. はじめに

第 IV 章では，畑作物の正常な生育に必要な空気間隙の確保という観点から，後退線の移動を把握するために，ガラスビーズと豊浦標準砂を用いて，単層について後退排水実験を行った。その結果，従来一定として仮定されてきた後退毛管力が，条件によって変数になることを明らかにした。このことから，成層の後退排水においても，後退毛管力が条件によって変化することを考慮しなければならないと考えられる。

そこで，本章では 2 層の成層について，後退毛管力が条件によって変化することを実験で明らかにし，Darcy 型の後退排水式を適用して，後退線の移動を把握するために，次のことを行った。

(i) 単層の後退排水実験の結果をもとに上層の後退毛管力の現れ方を予測し，この予測から上層と下層の境界の圧力水頭を計算で求めて，これらの値と実測値とが一致することを示した。

(ii) 単層の後退毛管力の区分条件，上層および下層の後退毛管力の現れ方から，後退毛管力が一定である場合と変化する場合の区分条件を一般化した。

(iii) 上層と下層に対して、それぞれ Darcy 型の後退排水式を適用し、後退線の移動を検討した。

なお、透水係数の異なる層が複数重なったものを成層と言うことにし、後退排水の方向は鉛直下向きとする。

## 2. 単層の実験結果から推測した上層と下層の後退毛管力と後退排水式

### 1) 上層の後退毛管力 $h_{dc_1}$ と後退排水式の推測

後退線が上層にある時の後退排水式は、

$$q_{d_1} = K_{d_1} \frac{Z + h_{dc_1} - h_p}{Z} \quad (5.1)$$

$q_{d_1}$  : 上層の排水強度 [cm/s]

$K_{d_1}$  : 上層の後退排水時透水係数 [cm/s]

$h_{dc_1}$  : 上層における後退毛管力 [cm]

$Z$  : 上層下端から後退線までの距離 [cm]

$h_p$  : 上層と下層の境界の圧力水頭 [cm]

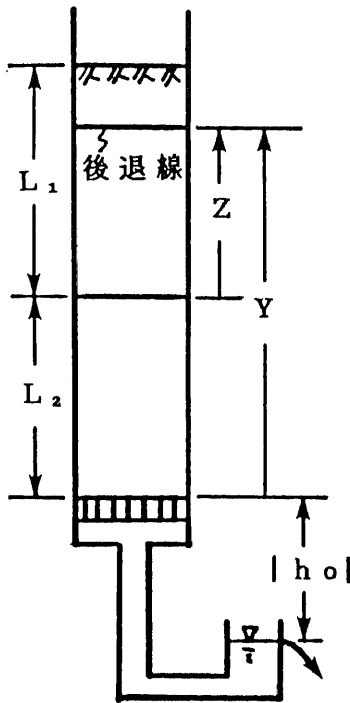
と考えられる。なお、記号については Fig.5-1 を参照されたい。

また、後退毛管力を区分する条件は、 $h_p$  が単層における試料層下端の圧力水頭  $h_o$  に相当するので、(4.13)式および(4.14)式の  $h_o$  を  $h_p$  に置き換えて、

$$- h_p \leq h_{c_1} \text{ のとき, } h_{dc_1} = - h_{c_1} \text{ (一定)} \quad (5.2)$$

$$- h_p > h_{c_1} \text{ のとき, } h_{dc_1} = \text{変数} \quad (5.3)$$

と考えられる。



$A$  : 試料層断面積 [ $\text{cm}^2$ ] (本論文では,  $A = 19.6 \text{ cm}^2$ )

$f$  : 比産出量 (単位体積当りの排水量) [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ]

$Q$  : 積算排水量 [ $\text{cm}^3$ ]

$t$  : 後退排水開始からの経過時間 [ $\text{s}$ ]

$q_d$  : 排水強度 [ $\text{cm/s}$ ]

$K_d$  : 後退排水時透水係数 [ $\text{cm/s}$ ]

$K_p$  : 浸透時透水係数 [ $\text{cm/s}$ ]

$h_{dc}$  : 後退毛管力 [ $\text{cm}$ ]

$h_o$  : 下層下端 (単層では層下端) の圧力水頭 (排水位) [ $\text{cm}$ ]

$h_p$  : 上層と下層の境界の圧力水頭 [ $\text{cm}$ ]

$h_{p'}$  : (5.6) 式で求めた  $h_p$  [ $\text{cm}$ ]

$h_b$  : 後退線直上の空気圧 [ $\text{cm}$ ]

$h_{dc_1}$  :  $Z \rightarrow 0$  の時の  $h_{dc_1}$  (上層下端の後退毛管力) [ $\text{cm}$ ]

$h_c$  : 後退毛管高 [ $\text{cm}$ ]

$L$  : 層の厚さ [ $\text{cm}$ ]

$Y$  : 後退線の位置 (下層下端—単層では層下端—から後退線までの距離) [ $\text{cm}$ ]

$Z$  : 上層における後退線の位置 (上層下端から後退線までの距離) [ $\text{cm}$ ]

$\alpha, \beta, \gamma, \omega$  : 定数

注 : 図中および本文中の各記号の添字の 1 は上層, 2 は下層,  $n$  は  $n$  層を示す。単層の記号には数字の添字をつけずに表した。

Fig.5-1 記号の説明

(5.1)式と連続の条件から  $h_p$  を求めると,

$$K_{d1} \frac{Z + h_{dc1} - h_p}{Z} = K_{d2} \frac{L_2 + h_p - h_o}{L_2}$$

が得られ,

$$h_p = \frac{Z L_2 (K_{d1} - K_{d2}) + Z h_o K_{d2} + h_{dc1} L_2 K_{d1}}{L_2 K_{d1} + Z K_{d2}} \quad (5.4)$$

$K_{d2}$  : 下層の後退排水時透水係数 [cm/s]

$L_2$  : 下層の厚さ [cm]

$h_o$  : 下層下端の圧力水頭 [cm]

が導かれる。(5.4)式を見ると、任意の  $Z$  に対して、 $h_{dc1}$  が決まらなければ、 $h_p$  を求めることができない。そこで、 $h_{dc1}$  を求めるために、 $-h_p$  と  $h_{c1}$  の関係を簡単に判定する方法を示す。

(1) 後退毛管力  $h_{dc1}$  が変化する場合

$h_p$  は単層の  $h_o$  に相当すると考えられるので、(4.15)式および

(4.16)式を(4.14)式に代入して得た式、

$$h_{dc} = -(h_o + h_c) Y / L + h_o$$

の  $h_o$  を、 $h_p$  に置き換え、 $L = L_1$ 、 $Y = Z$ 、 $h_c = h_{c1}$  として

$h_{dc1}$  を表すと、

$$h_{dc1} = -\frac{h_p + h_{c1}}{L_1} Z + h_p \quad (5.5)$$

が得られる。(5.5)式を(5.4)式に代入して整理すると、

$$h_p = \frac{L_1 L_2 (K_{d1} - K_{d2}) + L_1 h_o K_{d2} - h_{c1} L_2 K_{d1}}{L_2 K_{d1} + L_1 K_{d2}} \quad (5.6)$$

が導かれる。Kd<sub>1</sub>, Kd<sub>2</sub> は排水中一定と考えられるので、(5.6)式によるh<sub>p</sub>は定数になる。

したがって、(5.6)式で求めたh<sub>p</sub>の負値(-h<sub>p</sub>)がh<sub>c1</sub>より大きいとき、(5.3)式の条件より、h<sub>dc1</sub>は(5.6)式を代入した(5.5)式で表され、Zに関して直線的に変化することが推測される。

(2) 後退毛管力h<sub>dc1</sub>が一定である場合

(5.2)式の条件より、(5.6)式で求めたh<sub>p</sub>の負値がh<sub>c1</sub>より小さいか等しいとき、h<sub>dc1</sub>は一定と考えられる。すなわち、(5.6)式は、(5.4)式にZ=L<sub>1</sub>と、そのときのh<sub>dc1</sub>=-h<sub>c1</sub>を代入した式に等しく、(5.6)式で求めた-h<sub>p</sub>が、

$$-\frac{L_1 L_2 (Kd_1 - Kd_2) + L_1 h_o Kd_2 - h_{c1} L_2 Kd_1}{L_2 Kd_1 + L_1 Kd_2} \leq h_{c1} \quad (5.7)$$

であれば、(5.7)式を変形して、

$$Kd_1 L_2 / Kd_2 - L_2 + h_o + h_{c1} \geq 0 \quad (5.7)'$$

が導かれる。また、h<sub>dc1</sub>=-h<sub>c1</sub>(一定)を(5.4)式に代入して、

Zについて微分すると、

$$\frac{dh_p}{dZ} = \frac{L_2 Kd_1 Kd_2}{(L_2 Kd_1 + Z Kd_2)^2} \left( \frac{Kd_1 L_2}{Kd_2} - L_2 + h_o + h_{c1} \right) \quad (5.8)$$

が得られる。L<sub>2</sub>Kd<sub>1</sub>Kd<sub>2</sub>>0, (L<sub>2</sub>Kd<sub>1</sub>+ZKd<sub>2</sub>)<sup>2</sup>>0および(5.

7)'式から、

$$\frac{d h_p}{d Z} \geq 0, \text{ すなわち } \frac{d(-h_p)}{d Z} \leq 0 \quad (L_1 \geq Z > 0)$$

が成立する。ゆえに、 $-h_p$  は、 $Z$  が減少すれば一定であるかまたは増加し、 $Z \rightarrow 0$  のとき  $-h_p$  は最大になる。この値は、(5.4)式に  $h_{dc_1} = -h_{c_1}$  と  $Z \rightarrow 0$  を代入して求められ、 $\frac{d}{d Z}(-h_p) = h_{c_1}$  (最大値) が得られる。したがって、 $Z = L_1$  のとき  $-h_p \leq h_{c_1}$  であれば、 $h_{dc_1} = -h_{c_1}$  (一定) となり、後退線の位置  $Z$  について、 $L_1 \geq Z > 0$  の排水区間で  $-h_p \leq h_{c_1}$  が成立する。

以上のことから、(5.6)式で求めた  $h_p$  を  $h_p'$  とすると、(5.2)式、(5.3)式、(5.5)式より、

$$-h_p' \leq h_{c_1} \text{ のとき, } h_{dc_1} = -h_{c_1} \text{ (一定)} \quad (5.2)'$$

$$-h_p' > h_{c_1} \text{ のとき, } h_{dc_1} = -\frac{h_p' + h_{c_1}}{L_1} Z + h_p' \quad (5.3)'$$

のように、後退毛管力  $h_{dc_1}$  を区分することができると推測される。

また後退排水式は、後退毛管力が一定のとき、 $h_{dc_1} = -h_{c_1}$  および(5.4)式を(5.1)式に代入して、

$$q_{d_1} = K_{d_1} K_{d_2} \frac{Z - h_{c_1} + L_2 - h_0}{L_2 K_{d_1} + Z K_{d_2}} \quad (5.9)$$

であり、後退毛管力が変化する場合は、(5.5)式、(5.6)式を(5.1)式に代入して、

$$q_{d_1} = K_{d_1} K_{d_2} \frac{L_1 - h_{c_1} + L_2 - h_0}{L_2 K_{d_1} + L_1 K_{d_2}} \text{ (一定)} \quad (5.10)$$

と考えられる。

## 2) 下層の後退毛管力 $h_{dc_2}$ と後退排水式の推測

後退線が下層にあるときの後退排水式は，単層の後退排水式—(4.2)式—と同じと考えられる。しかし，下層では  $h_{dc_2}$  の一定・変化の区分が，単層のときに行った  $h_c$  と  $h_o$  の関係だけではできず，上層下端の後退毛管力の値によっても影響されることが，本章の成層の後退排水実験からわかった。したがって，下層に後退線があるときの後退毛管力と後退排水式については，本章の 4.2) および 4.3) で推測することにする。

## 3. 後退排水実験

### 1) 試料

用いた試料は，粒径  $0.25\sim 0.105\text{mm}$  の細粒ガラスビーズと粒径  $0.50\sim 0.25\text{mm}$  の粗粒ガラスビーズであり，単層の実験—第IV章—で用いたものと同じである。

### 2) 実験方法

試料を内径  $5\text{cm}$ ，長さ  $100\text{cm}$  の透明アクリル円筒に，単位体積重量がそれぞれ一定になるように充填した。上層と下層の境界には，そ



これらの試料が混合しないようにするためのものは、何も入れていない。

その他一後退線の位置，後退毛管力，排水量の測定方法および実験装置などについては，第IV章の単層の後退排水実験と同じにした。また，後退排水中における上層と下層の境界の圧力水頭  $h_p$  を測るために，それらの層の境界に受感部を設けた。なお，実験中の水温変化は， $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内であった。

本章で用いた実験の条件を Table 5.1 に示す

Table 5.1 実験条件

	No. 11		No. 12		No. 13	
	上層	下層	上層	下層	上層	下層
試料 (ガラスビーズ)	粗粒	細粒	細粒	粗粒	細粒	粗粒
試料層の厚さ $L$ [cm]	41	47	31.5	58.5	31.5	59.5
浸透時透水係数 $K_p$ [ $10^{-2}\text{cm/s}$ ]	10	1.2	1.4	7.2	1.4	7.3
後退毛管高 $h_c$ [cm]	17	45	39	18	35	17
比産出量 $f$ [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ]	0.23	0.16	0.17	0.26	0.12	0.28
排水位 $h_o$ [cm]	-36		15		0	
水温 $T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	30.0		26.5		20.0	

\* 細粒，粗粒：それぞれ粒径 0.25~0.105 mm, 0.50~0.25 mm

\*  $K_p$  :  $T^\circ\text{C}$ における値。

#### 4. 実験結果と考察

- 1) 上層の後退毛管力  $h_{dc_1}$  , 上層と下層の境界の圧力水頭  $h_p$  の推定値とその実測による確認

実験No.11, No.12, No.13 の  $-h_{p'}$  [(5.6)式で求めた  $-h_p$  の値] は, それぞれ  $-14, 34, 45$  [cm] である。したがって, (5.2)', (5.3)' 式から, 上層の後退毛管力は次のように推測することができる。

実験No.11 は, Table 5.1 示すように,  $h_{c_1} = 17$  [cm] であり, 上述したように,  $-h_{p'} = -14$  [cm] であるから,  $-h_{p'} < h_{c_1}$  の条件にある。ゆえに, (5.2)' 式から,  $h_{dc_1} = -17$  [cm] (一定) になると推定される。

実験No.12 は,  $h_{c_1} = 39$  [cm] —Table 5.1 — および  $-h_{p'} = 34$  [cm] であるから,  $-h_{p'} < h_{c_1}$  の条件にあり, (5.2)' 式から  $h_{dc_1} = -39$  [cm] (一定) と推定される。

実験No.13 は,  $h_{c_1} = 35$  [cm] —Table 5.1 — および  $-h_{p'} = 45$  [cm] であるから,  $-h_{p'} > h_{c_1}$  の条件にある。したがって, (5.3)' 式から,  $h_{dc_1}$  は  $Z$  に関して直線的に変化すると予測され, また  $h_p = h_{p'}$  (一定) と推定される。

これらの推測を確認するために, 後退毛管力および上層と下層の境界の圧力水頭の測定結果を, Figs.5-2, 5-3, 5-4 に示す。

後退線が上層にあるときの後退毛管力  $h_{dc1}$ ，上層と下層の境界の圧力水頭  $h_p$  は，どの実験でも推測した計算値とほぼ一致することが認められる。ただし，実験No.12 の  $h_{dc1}$  は，多少変化しているようにも見えるが，計算値と測定値との差が最も大きいのは  $Y = 63.5$  [cm] での約 8% で，その差は小さいと判断し，さらに上層と下層の境界の後退毛管力が再び  $-h_{c1}$  に等しくなっていることから， $h_{dc1}$  は一定とみなした。したがって，(5.2)'，(5.3)'，(5.4)，(5.5)，(5.6) の各式は，上層の後退排水現象に適用できると結論される。このことから，上層での  $h_{dc1}$  は，単層での排水位  $h_o$  を  $h_p$  に置き換えることによって推定できる。

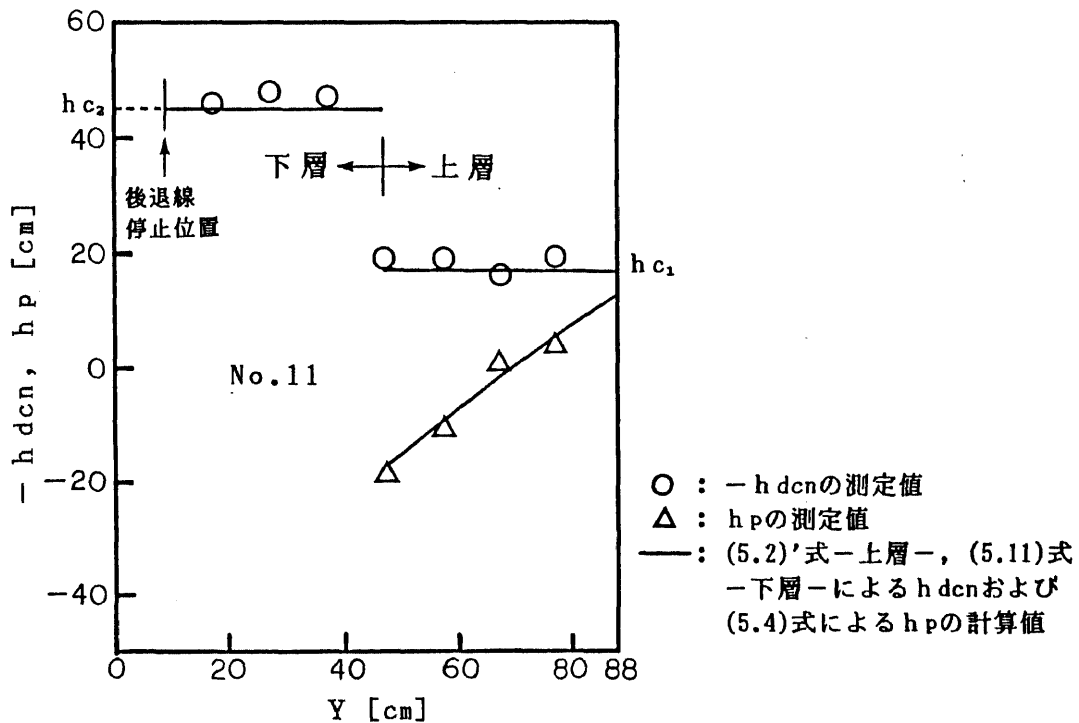


Fig.5-2 後退線の各位置  $Y$  における後退毛管力  $h_{dcn}$  と，上層と下層の境界の圧力水頭  $h_p$

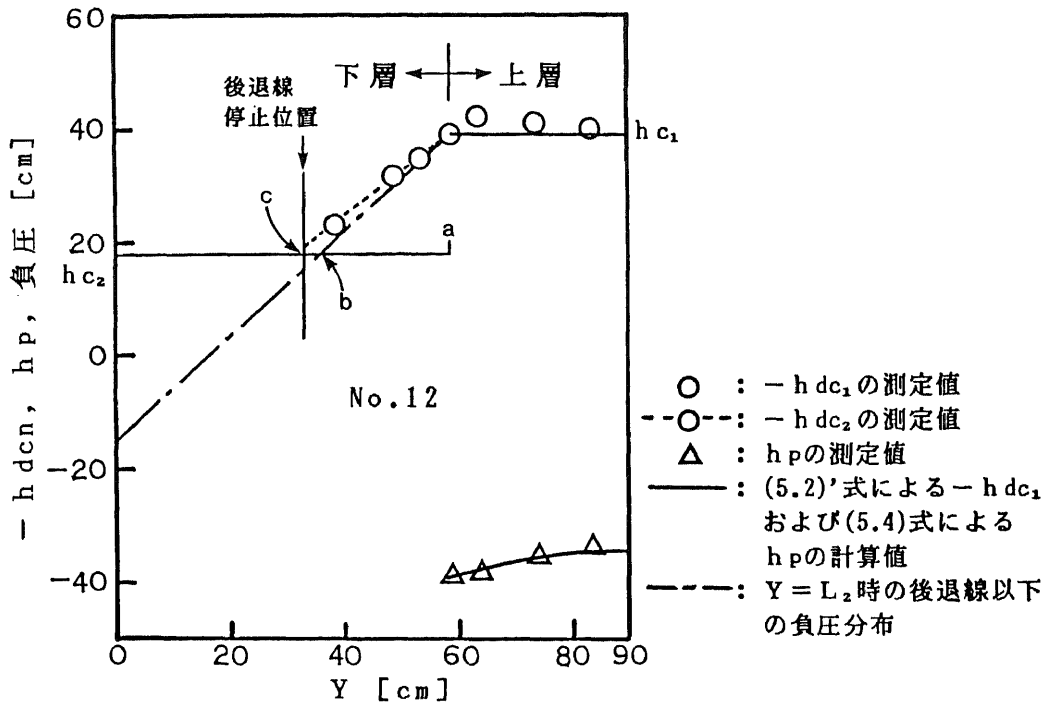


Fig.5-3 後退線の各位置 Y における後退毛管力  $h_{dcn}$  と、上層と下層の境界の圧力水頭  $h_p$  および後退線がその境界にある時の後退線より下の負圧分布

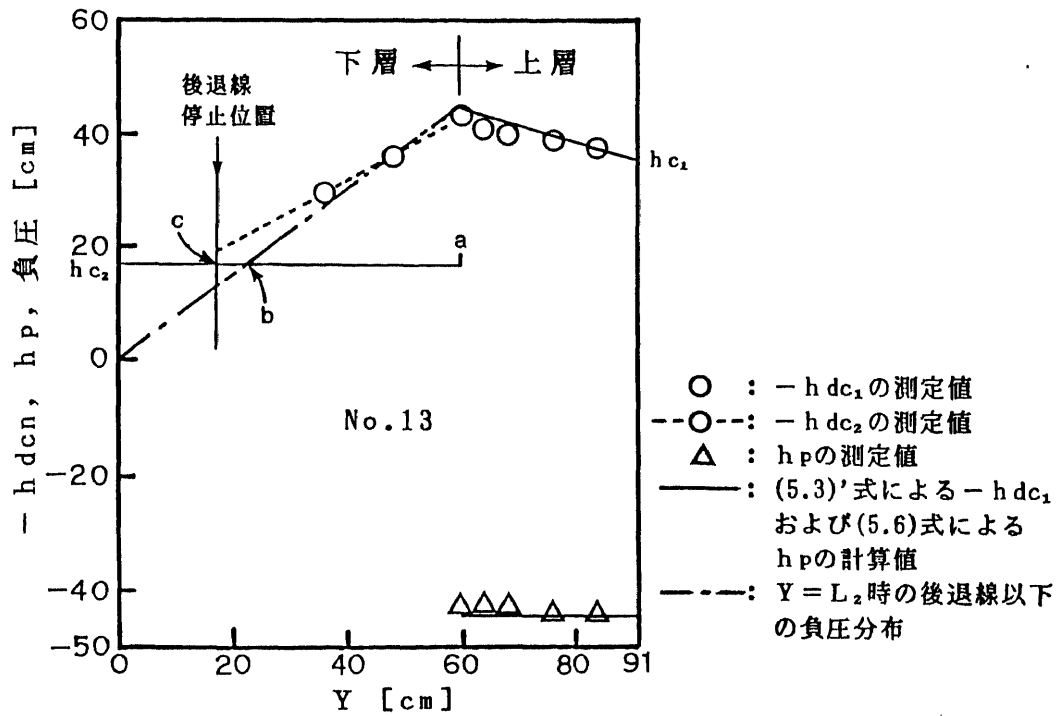


Fig.5-4 後退線の各位置 Y における後退毛管力  $h_{dcn}$  と、上層と下層の境界の圧力水頭  $h_p$  および後退線がその境界にある時の後退線より下の負圧分布

## 2) 下層の後退毛管力 $h_{dc_2}$ の検討

後退線が下層に侵入したときの下層における後退毛管力について、単層の後退毛管力の区分条件—(4.13)式，(4.14)式—を適用すると、実験No.11，No.12，No.13 はすべて、Table 5.1 にみるように、 $-h_0 < h_{c_2}$  の条件にある。したがって、(4.13)式から、 $h_{dc_2}$  は一定で、 $-h_{c_2}$  に等しいと考えられる。しかし、実験結果をみると、実験No.11 は Fig.5-2 に示すように、 $h_{dc_2} = -h_{c_2}$  (一定)とみることができるが、実験No.12，No.13 では、Figs.5-3，5-4 に示すように、 $h_{dc_2}$  は明らかに変化している。

そこで、下層の  $h_{dc_2}$  の区分条件について検討を加える。上述したように、 $h_{dc_2}$  は、下層下端で  $-h_0 \leq h_{c_2}$  という共通な境界条件をもつにもかかわらず、実験No.11 では一定であり、実験No.12，No.13 では変化する。それゆえに、実験No.11 と実験No.12，No.13 との条件の相違を調べてみると、下層上端の境界条件を異にしていることがわかったので、次に説明する。

### (1) $h_{dc_2}$ が一定である実験No.11 の場合

上層の下端における後退毛管力は、 $Z \rightarrow 0$  のときの  $h_{dc_1}$  であり、これを  $\downarrow h_{dc_1}$  と表すことにする。実験No.11 の場合、Fig.5-2 に示すように、 $h_{dc_1} = -h_{c_1}$  (一定)になることから、 $\downarrow h_{dc_1} =$

-  $h_{c_1}$  である。したがって、Table 5.1 の条件  $h_{c_1} < h_{c_2}$  から、

$$-\downarrow\downarrow\downarrow h_{dc_1} < h_{c_2}$$

の条件にある。

このとき、下層上端での  $h_{dc_2}$  は、Fig.5-2に示すように、 $-h_{c_2}$  になる。

なお、上層と下層の厳密な境界上での後退毛管力は測定できないので不明である。

(2)  $h_{dc_2}$  が変化する実験No.12, No.13 の場合

実験No.12 では、Fig.5-3 に示すように、 $h_{dc_1} = -h_{c_1}$  (一定) であるから、 $\downarrow\downarrow\downarrow h_{dc_1} = -h_{c_1}$  になる。ゆえに、Table 5.1 の条件  $h_{c_1} > h_{c_2}$  から、実験No.12 では、

$$-\downarrow\downarrow\downarrow h_{dc_1} > h_{c_2}$$

の条件にある。

このとき、下層上端での  $h_{dc_2}$  は、 $\downarrow\downarrow\downarrow h_{dc_1}$  に等しくなる (Fig.5-3)。

一方、実験No.13 では、 $h_{dc_1}$  は Fig.5-4 の実線で示した直線— (5.3)'式—で表される。したがって、 $\downarrow\downarrow\downarrow h_{dc_1} = h_{p'}$  になり、(5.3)'式および Table 5.1 の条件  $h_{c_1} > h_{c_2}$  から、

$$-\downarrow\downarrow\downarrow h_{dc_1} > h_{c_2}$$

の条件にあり，実験No.12と同じ条件である。

このとき，下層上端の  $h_{dc_2}$  は，Fig.5-4に示すように， $\frac{1}{2} \rho h_{dc_1}$  ( $= h_{p'}$ ) に等しい。

このように，下層の後退毛管力  $h_{dc_2}$  は， $-h_o \leq h_{c_2}$  を前提条件としながらも，

$$-\frac{1}{2} \rho h_{dc_1} \leq h_{c_2} \text{ のとき， } h_{dc_2} = -h_{c_2} \text{ (一定)} \quad (5.11)$$

$$-\frac{1}{2} \rho h_{dc_1} > h_{c_2} \text{ のとき， } h_{dc_2} = \text{変数} \quad (5.12)$$

をも区分条件に加えなければならぬ。したがって，下層の後退毛管力を区分すると，Table 5.2 のようになると考えられる。

Table 5.2 下層における後退毛管力( $h_{dc_2}$ )の区分

下層下端の境界条件	下層上端の境界条件	$h_{dc_2}$ の区分
$-h_o \leq h_{c_2}$	$-\frac{1}{2} \rho h_{dc_1} \leq h_{c_2}$	定数
	$-\frac{1}{2} \rho h_{dc_1} > h_{c_2}$	変数
$-h_o > h_{c_2}$	$-\frac{1}{2} \rho h_{dc_1} \leq h_{c_2}$	変数
	$-\frac{1}{2} \rho h_{dc_1} > h_{c_2}$	変数

すなわち，下層の後退毛管力は，その層の上端と下端の両境界条件によって決まると結論される。

それでは，単層および上層では，Table 5.2 の関係はどうなっているのでしょうか。単層および上層では，層下端の境界条件だけで

後退毛管力を区分した。ここで、下層の区分条件と矛盾のないことを説明する。

湛水消失の直前（メニスカス形成前）の上層上端の圧力水頭は 0 [cm] で、その後メニスカスが瞬間的に形成されて、0 [cm] から急激に低下し、 $-h_{c_1}$  [cm] になる（単層では上層と同じことになるので、以下上層の記号のみを用いる）。この  $-h_{c_1}$  は、後退線が上層上端にあるときの後退毛管力である。したがって、上層上端の境界条件は、下層と同じ記号を用いると、 $\psi_{dc_0} = 0$  となり、常に(5.11)式の条件にある（ $-\psi_{dc_0} < h_{c_1}$ ）。したがって、単層および上層における後退毛管力の区分は層下端の境界条件だけで行うことができる（Table 5.2 参照）。

次に、変化するときの下層の後退毛管力  $h_{dc_2}$  の値を検討する。

(5.2)' 式、(5.3)' 式は次のように解釈できる。

変化する場合の上層の後退毛管力  $h_{dc_1}$  は、(5.3)' 式—(5.6) 式を(5.5) 式に代入した式一で求められる。この式は、上層上端 ( $Z = L_1$ ) の  $h_{dc_1} = -h_{c_1}$  と上層下端 ( $Z \rightarrow 0$ ) の  $\psi_{dc_1} = h_{p'}$  とを結んだ直線によって、 $h_{dc_1}$  が表されることを示している。一方、後退線が上層上端にあるときの上層内の各位置の圧力水頭は、上層上端での  $h_{dc_1} = -h_{c_1}$ 、上層と下層の境界の圧力水頭  $h_{p'}$



とを結んだ直線で表される。したがって、(5.3)'式は、後退線が層の上端にあるときの層の圧力水頭分布をも表した式である。このとき、(5.3)'式の条件  $-h_p' > h_{c1}$  すなわち  $h_p' < -h_{c1}$  から、後退線が層上端にあるときの層の各位置の圧力水頭は、 $-h_{c1}$  より小さいことがわかる。これに対し、 $h_{dc1}$  が一定である場合は、(5.2)'式の条件  $-h_p' \leq h_{c1}$  すなわち  $h_p' \geq -h_{c1}$  から、上述した圧力水頭は  $-h_{c1}$  より大きいかまたは等しい。単層でも同じことが言える。

そこで単層および2層の結果から、3層以上の成層の場合にも拡張できると考えて整理すると、第  $n$  層の後退毛管力  $h_{dcn}$  は、

対象となる  $n$  層の上端に後退線があるときの  $n$  層内の各位置  $Y$  の圧力水頭  $h(Y)$  が、

①  $n$  層の後退毛管高の負値  $-h_{cn}$  より大きいか等しい時、すなわち、 $h(Y) \geq -h_{cn}$  の時、 $h_{dcn} = -h_{cn}$  (一定) である。

②  $h(Y) < -h_{cn}$  の時、 $h_{dcn} = h(Y)$  (変数) である。

ここで、

$$h(Y) = \{ (n \text{ 層上端での後退毛管力}) - (n \text{ 層の上端に後退線があるときの } n \text{ 層下端の圧力水頭}) \} Y / L_n + (n \text{ 層の上端に後退線があるときの } n \text{ 層下端の圧力水頭})$$

$L_n$  :  $n$  層の厚さ [cm]

$Y$  :  $n$  層下端からの位置 [cm]

以上のように区分し、 $h_{dcn}$ の値を求めることができると考えられる。

①、②の結論から、実験No.12, No.13の下層の後退毛管力 $h_{dc_2}$ を推測する。後退線が下層上端にあるときの理論的な圧力水頭分布は、Figs.5-3, 5-4の一点鎖線で示したようになり、これは測定値とほぼ一致した。この圧力水頭の負値は、位置 $a \sim b$ の領域では、 $h_{c_2}$ より大きく、位置 $b$ より低い位置では、 $h_{c_2}$ より小さい。したがって、位置 $a \sim b$ の領域では、上述した圧力水頭が $-h_{c_2}$ より小さくなり、②から $h_{dc_2}$ は変化し、各位置の $h_{dc_2}$ の値は、Figs.5-3, 5-4に一点鎖線で示した各位置の圧力水頭に等しいと推測される。位置 $b \sim c$ の領域では、上述した圧力水頭が $-h_{c_2}$ より大きくなり、①から $h_{dc_2} = -h_{c_2}$ （一定）で、位置 $c$ で後退線は停止すると考えられる。

そこで、位置 $a \sim b$ の領域における $h_{dc_2}$ の測定値をFigs.5-3, 5-4に示し、その回帰直線を点線で示した。 $h_{dc_2}$ の測定値は、推測値（Figs.5-3, 5-4の一点鎖線）に近い値であるが、後退線が降下するにつれて一点鎖線から一定の傾向をもって離れる。この原因は、下層の空気間隙部の空気圧の影響と思われるので、このことを解釈してみる。

実験No.12, No.13 では、上層と下層の境界の上部に毛管懸垂水を生じ、これは肉眼で観察できる。この毛管懸垂水のために、上層と下層の境界上部の空気透過係数は小さくなり、このような状況をつくりながら、後退線が降下するために、下層間隙部への空気侵入が阻害され、下層空気間隙部の空気圧が低下したと考えられる。このことは、後退線通過後の圧力計の示す値が、上層、実験No.11の下層および単層では、 $-2 \sim -4$  [cm] であるのに対し、実験No.12, No.13の下層では、 $-8 \sim -10$  [cm] であったことから推測される。なお、実験No.12, No.13で毛管懸垂水を生じたのは、 $h_{c1} > h_{c2}$  であったためであり、実験No.11では、 $h_{c1} < h_{c2}$  であるために毛管懸垂水は生じない。

すなわち、実験No.12, No.13の下層で実測された後退毛管力は、これまでに述べてきた後退毛管力  $h_{dc2}$  と後退線直上の空気圧  $h_b$  の和 ( $h_{dc2} + h_b$ ) と考えられる。ここでは、実験No.12, No.13の ( $h_{dc2} + h_b$ ) は、Figs.5-3, 5-4の実測値から直線的に変化するとみなし、

$$h_{dc2} + h_b = \omega Y + \gamma \quad (5.13)$$

$\omega, \gamma$  : 実験定数

として、後の解析に用いることにする。

なお、本実験では、位置  $b \sim c$  の領域での  $h_{dc2}$  の測定は行っ

ていない。それは、後退線が停止する直前の領域での  $h_{dc_2}$  の測定は困難であり、さらに位置  $b \sim c$  の領域の幅が狭いためである。

### 3) 上層と下層における後退排水式の検討

上層の後退排水式は、後退毛管力  $h_{dc_1}$  が一定の場合(5.9)式であり、 $h_{dc_1}$  が変化する場合(5.10)式である。

また、下層の後退排水式は、(4.2)式と前の2)で述べた後退毛管力から、

$$q_{d_2} = K_{d_2} \frac{Y + h_{dc_2} + h_b - h_o}{Y} \quad (5.14)$$

と考えられる。ただし、 $h_{dc_2}$  が一定のとき、 $h_{dc_2} = -h_{c_2}$ 、 $h_b = 0$  であり、 $h_{dc_2}$  が変化するとき、 $(h_{dc_2} + h_b)$  は(5.13)式で表すことにする。

そこで、(5.9)式、(5.10)式、(5.14)式のそれぞれの後退排水式および(5.13)式が適用できるかどうかを検討するために、これらの各式で計算した排水強度  $q_{dn}$  と次式で求める測定値  $q_{dn}$ 、

$$q_{dn} = \Delta Q / (A \Delta t) \quad \text{再出(4.1)}$$

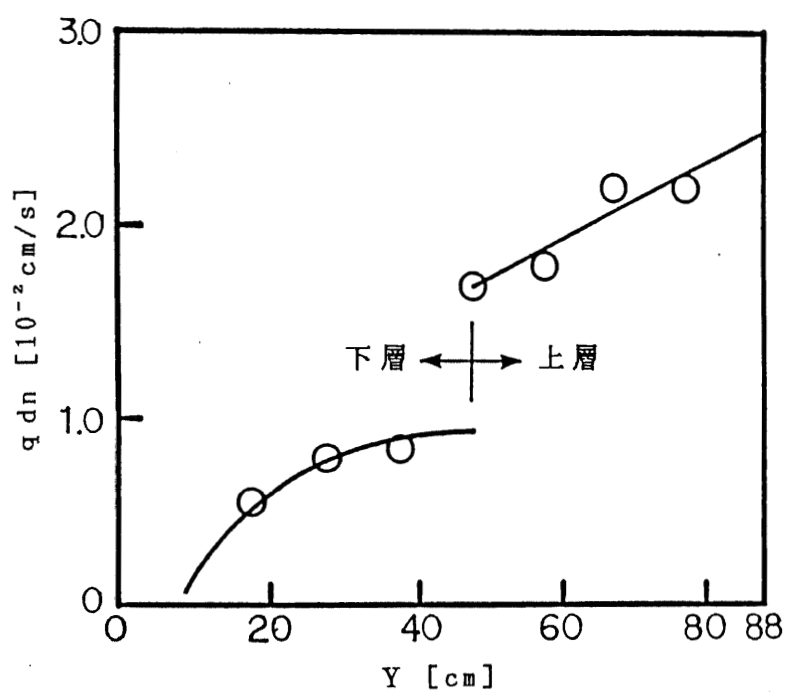
$\Delta t$  : 時間 [s] ,  $A$  : 試料層断面積 [cm<sup>2</sup>]

$\Delta Q$  :  $\Delta t$  [s] 間の排水量 [cm<sup>3</sup>]

との比較を行う。後退排水時透水係数  $K_{dn}$  は浸透時透水係数  $K_{pn}$  を用いた。

実験No.11では、Fig.5-5に示すように、(5.9)式—上層—および  $hdc_2 = -hc_2$ 、 $hb=0$  を代入した(5.14)式—下層—による計算値と(4.1)式による測定値とは、ほぼ一致する。

なお、上層と下層の境界での排水強度は、測定できないので不明であり、今後の問題として残る。



○ : 測定値 [(4.1)式参照]  
 — : (5.9)式—上層—,  $hdc_2 = -hc_2$ ,  $hb=0$   
 を代入した(5.14)式—下層—による計算値

Fig.5-5 後退線の各位置 Y における排水強度  $q_{dn}$  (No.11)

実験No.12では、Fig.5-6に示すように、(5.9)式—上層—および(5.13)式を代入した(5.14)式—下層—による計算値と(4.1)式による測定値とは、 $Y = 83.5$  [cm]で測定値と計算値の差が約13%であることを最大にして、その他ではほぼ一致するとみることができる。なお、(5.13)式の $\omega$ 、 $\gamma$ の値は、Fig.5-3の $h_{dc_2}$ の実測値から、 $\omega = -0.79$ 、 $\gamma = 7.3$  [cm]を用いた。

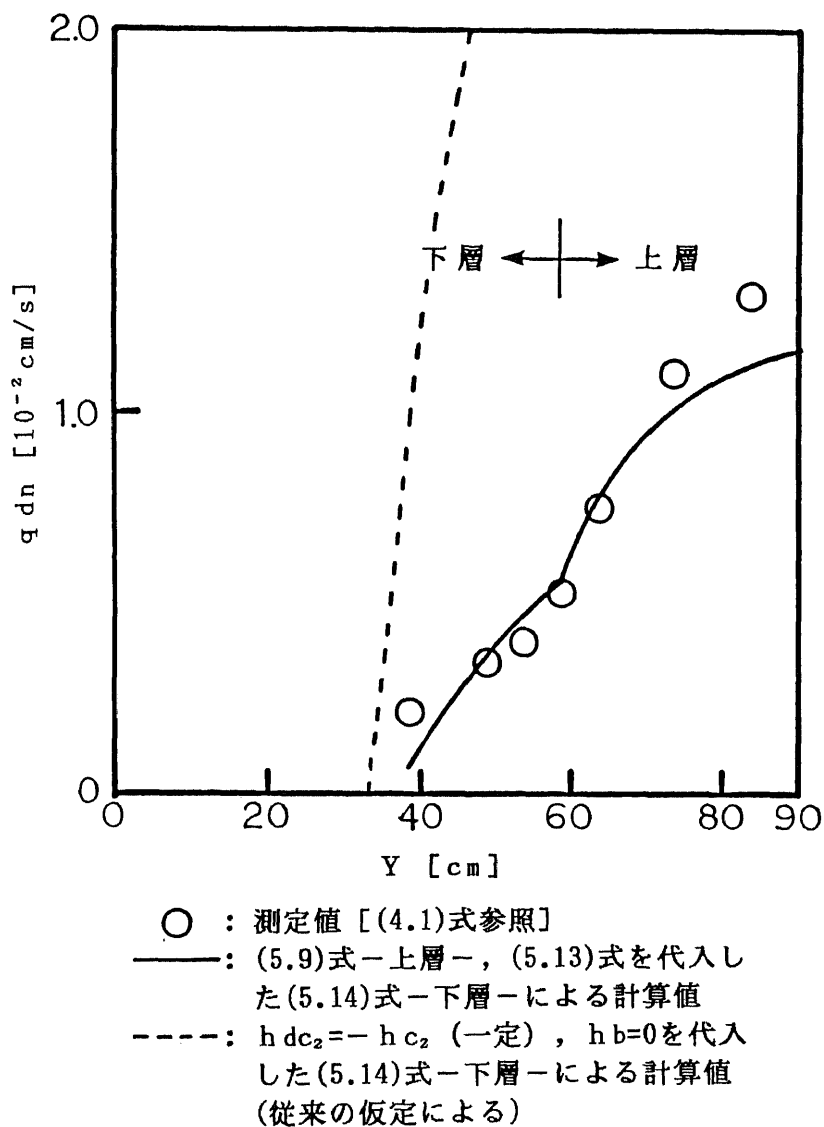


Fig.5-6 後退線の各位置Yにおける排水強度 $q_{dn}$  (No.12)

実験No.13 では，後退毛管力の変化を考慮した(5.10)式－上層－  
 および(5.13)式を代入した(5.14)式－下層－による計算値と(4.1)  
 式による測定値とは，Fig.5-7 にみるように，ほぼ一致する。なお，  
 (5.13)式の  $\omega$ ， $\gamma$  の値は，Fig.5-4 の  $h_{dc_2}$  の実測値から， $\omega =$   
 $-0.56$ ， $\gamma = -9.4$  [cm] を用いた。

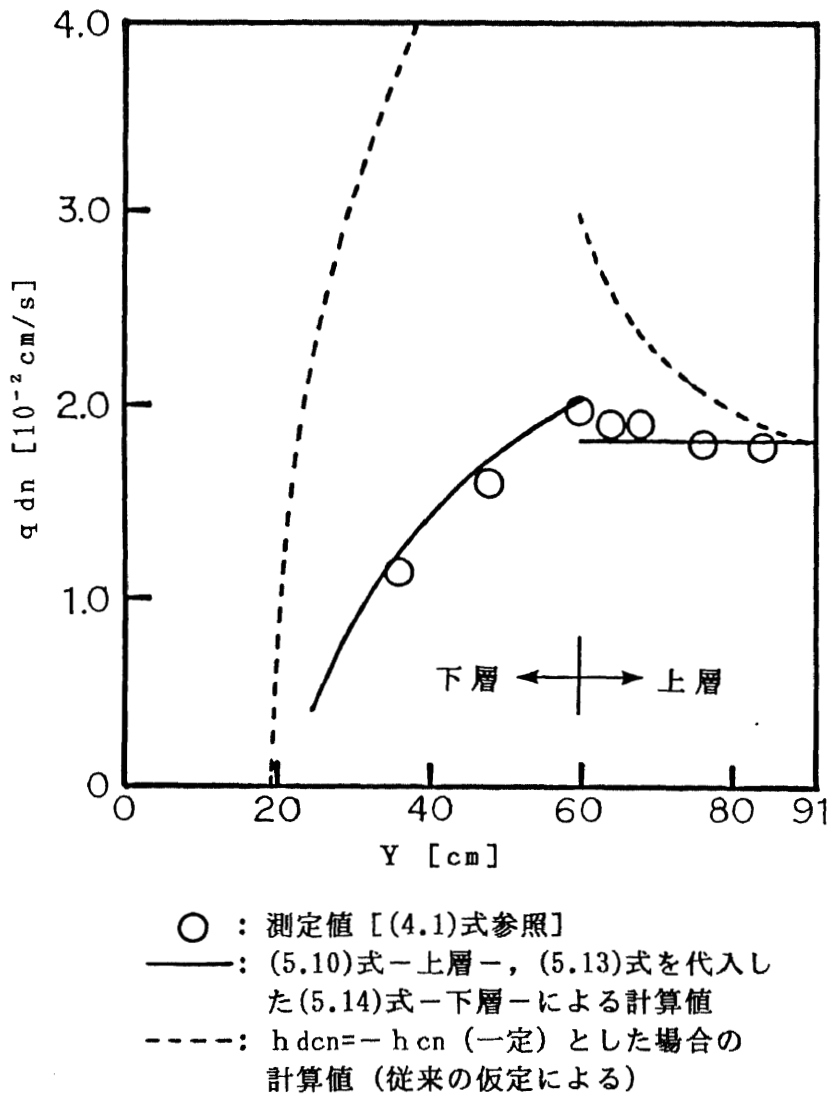


Fig.5-7 後退線の各位置 Y における排水強度  $q_{dn}$  (No.13)

また，後退毛管力が変化する実験No.12 の下層，実験No.13 の両層に対して，従来の仮定を適用して，後退毛管力を一定とした後退排水式を用いて排水強度を計算すると，Figs.5-6, 5-7 に点線で示すように，測定値と大きく異なる。

以上のことから，(5.9)式，(5.10)式，(5.14)式の各後退排水式は，2層の成層の後退排水現象に適用することができ，後退毛管力が変化するという認識は重要である。また，後退排水時透水係数は浸透時透水係数に等しい。

#### 4) 後退線の位置 Y と時間 t の関係

前の 3) で(5.9)式，(5.10)式，(5.14)式および(5.13)式は適用できることがわかった。これらの式と次式とから，Y と t の関係式を導き，実測値と比較する。積算排水量 Q と Z あるいは Y の関係は，比産出量  $f_1$  (上層)， $f_2$  (下層) が一定であることから，

$$\frac{dQ}{dZ} = -A \cdot f_1 \quad (5.15), \quad \frac{dQ}{dY} = -A \cdot f_2 \quad (5.16)$$

と考えられ— (4.17)式参照 —，また(4.1)式から，

$$q_d = \frac{1}{A} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (4.1)'$$

を得る。

上層において，後退毛管力が一定 ( $h_{dc_1} = -h_{c_1}$ ) のとき，



(5.9)式, (5.15)式, (4.1)'式から,

$$t_1 = \frac{f_1}{K d_1 K d_2} \{ K d_2 (L_1 - Z) + (L_2 K d_1 + H K d_2) \ln \frac{L_1 - H}{Z - H} \} \quad (5.17)$$

が導かれる。ただし,  $H = h_{c1} + h_o - L_2$  である。

同じく上層において, 後退毛管力が変化するとき, (5.10)式, (5.15)式, (4.1)'式から,

$$t_1 = \frac{f_1 (L_2 K d_1 + L_1 K d_2)}{K d_1 K d_2 (L_1 + L_2 - h_{c1} - h_o)} (L_1 - Z) \quad (5.18)$$

を得る。

下層について, 後退毛管力が一定のとき,  $h_{dc2} = -h_{c2}$ ,  $h_b = 0$  を代入した(5.14)式, (5.16)式, (4.1)'式から,

$$t_2 = \frac{f_2}{K d_2} \{ L_2 - Y - (h_{c2} + h_o) \ln \frac{Y - h_{c2} - h_o}{L_2 - h_{c2} - h_o} \} \quad (5.19)$$

また, 後退毛管力が変化するとき, (5.13)式を代入した(5.14)式,

(5.16)式, (4.1)'式から,

$$t_2 = \frac{f_2}{(1 + \omega)^2 K d_2} \{ (1 + \omega) (L_2 - Y) + (\gamma - h_o) \ln \frac{(1 + \omega) Y + \gamma - h_o}{(1 + \omega) L_2 + \gamma - h_o} \} \quad (5.20)$$

の各式を導くことができる。

後退線が上層において  $Z \rightarrow 0$  のとき, 後退排水開始からの経過時間を  $t_{z \rightarrow 0}$  とすると, 後退線が下層にあるときの後退排水開始か

らの経過時間  $t$  は、

$$t = t_{z=0} + t_2 \quad (5.21)$$

になる。

後退毛管力が一定の場合と変化する場合について、上層と下層のそれぞれに対して導いた  $Y$  と  $t$  の関係式による計算値が、実測値とほぼ一致することを、Figs.5-8, 5-9, 5-10 に示す。  $K_{dn}$  は浸透時透水係数を用いた。  $\omega$  ,  $\gamma$  の値は、前の 3) で排水強度を計算するときを用いた値を、その他の値は、Table 5.1 の値を用いた。

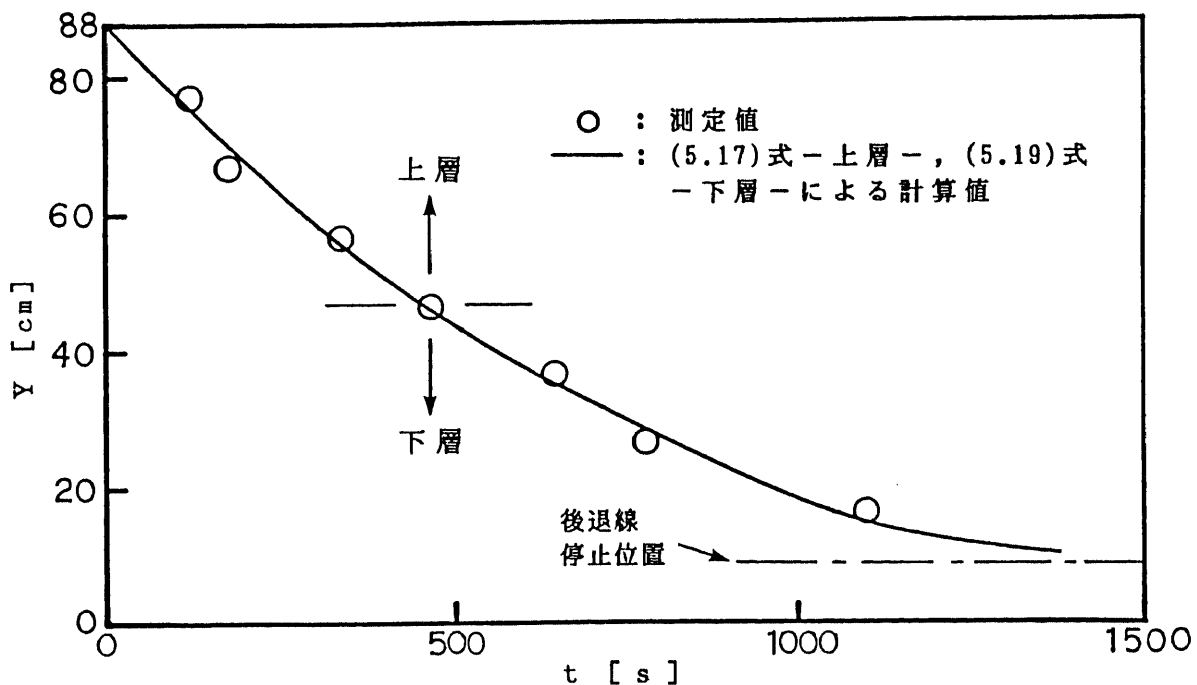


Fig.5-8 後退線の各位置  $Y$  における時間  $t$  (No.11)

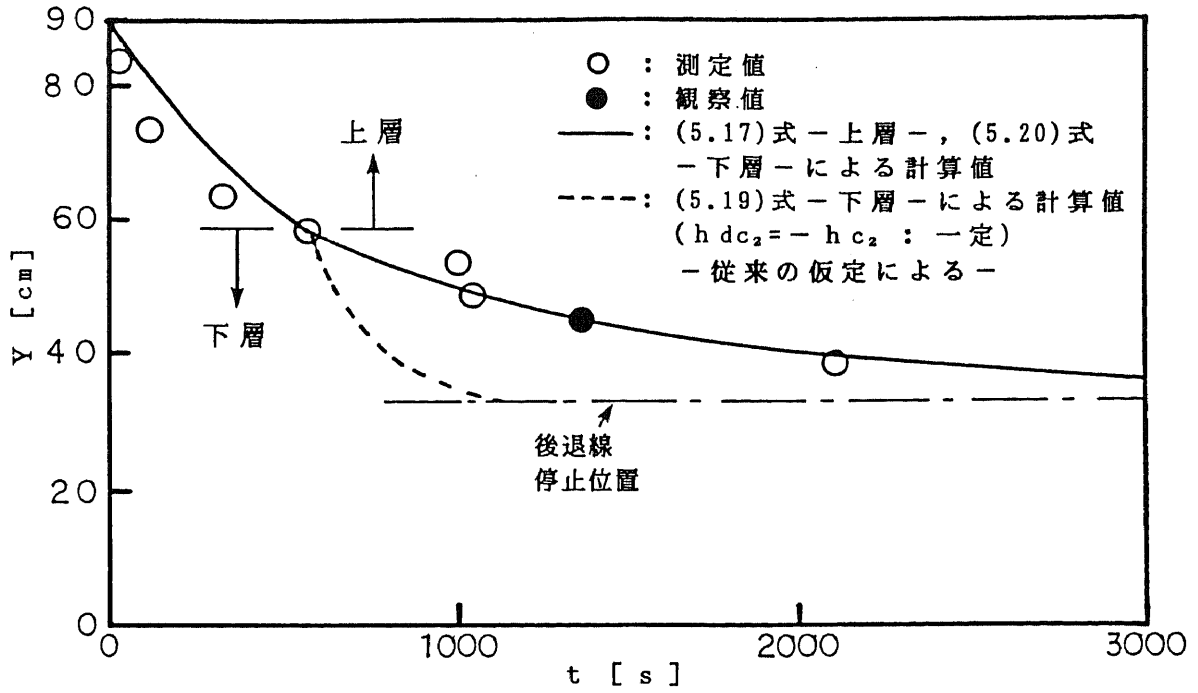


Fig.5-9 後退線の各位置 Y における時間 t (No.12)

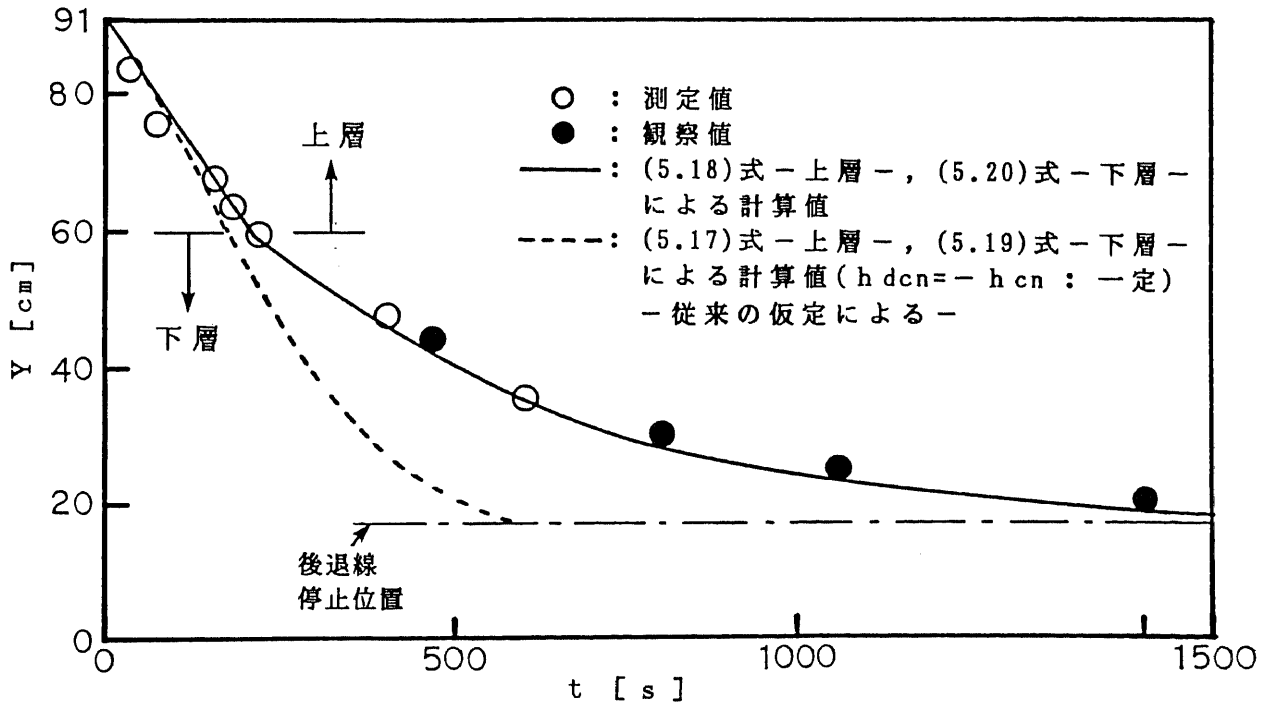


Fig.5-10 後退線の各位置 Y における時間 t (No.13)

なお、測点数が少ないので、実験No.12 ( Fig.5-9 )，実験No.13 ( Fig.5-10 ) には、実験用円筒壁面上の観察により求めた後退線の位置と時間をもプロットした。

また、後退毛管力が変化する場合の実験No.12 の下層 ( Fig.5-9 )，実験No.13 の両層 ( Fig.5-10 ) については、従来の仮定にもとづいて、後退毛管力を一定とした(5.17)式—上層—，(5.19)式—下層—を用いて、 $Y$ と $t$ の関係を求め、それぞれの図中に点線で示した。これらは実測値と大きく異なり、本研究の意味づけが行える。

## 5. まとめ

2層の成層における飽和状態からの排水について、後退線の移動を把握するためにガラスビーズを用いて後退排水実験を行い、2層の場合も単層と同じ理論が成り立つことを実験的に検証した。これを3層以上にも拡張して考えると、次のようにまとめられる。

1) 単層，成層にかかわらず，後退毛管力  $h_{dcn}$  は次のように区分できる。

(1) 対象となる  $n$  層の上端に後退線があるときの  $n$  層内の各位置  $Y$  の圧力水頭  $h(Y)$  が，

①  $n$  層の後退毛管高の負値  $-h_{cn}$  より大きいか等しい時，すな

わち， $h(Y) \geq -h_{cn}$  の時， $h_{dcn} = -h_{cn}$ （一定）である。

②  $h(Y) < -h_{cn}$  の時， $h_{dcn} = h(Y)$ （変数）である。

$h(Y)$ を求める式については，P.61 を参照されたい。

しかし， $n$ 層の上層の後退毛管高が $n$ 層のそれよりも大きい場合には， $n$ 層とその上層との境界上部に毛管懸垂水を生じて， $n$ 層の間隙空気圧が低下するために，②の条件であっても， $n$ 層で測定した後退毛管力は，上述した圧力水頭 $h(Y)$ よりも小さくなる。ただし，この空気圧の影響についての細かな検討は行っていない。

(2)  $n$ 層上端での後退毛管力は， $n$ 層の上層下端での後退毛管力の負値が， $h_{cn}$ より小さいか等しいとき  $-h_{cn}$  であり， $h_{cn}$ より大きいとき，上層下端の後退毛管力に等しい。

すなわち，2層の成層では， $-\downarrow_{\downarrow} h_{dc_1} \leq h_{c_2}$  のとき，下層上端の $h_{dc_2}$ は  $-h_{c_2}$  になり， $-\downarrow_{\downarrow} h_{dc_1} > h_{c_2}$  のとき，下層上端の $h_{dc_2}$ は  $\downarrow_{\downarrow} h_{dc_1}$  に等しい。

また，2層の成層での後退毛管力の区分条件およびその値は，上層では (5.2)'式，(5.3)'式，下層では (5.11)式，(5.12)式あるいは Table 5.2 による。なお，変化するときの $h_{dc_2}$ の値は，本実験条件では空気圧の影響があったので，

(5.13)式によって表した。

2) 成層の後退排水現象は、基本的には単層の後退排水現象と同じである。すなわち、

- ① Darcy 型の後退排水式は適用できる。
- ② 後退排水時透水係数は浸透時透水係数に等しい。
- ③ 比産出量は一定と考えてよい。

1), 2) のことから導いた後退線の移動—後退線の位置と時間の関係—を表す (5.17)~(5.20)式は、実際の現象とよく合う。

## 第VI章 充填土による検証

### 1. はじめに

第IV章および第V章では、ガラスビーズと豊浦標準砂について後退排水実験を行った。本章では、これらの実験で得た知見が、ガラスビーズなどに比べ間隙径の分布や間隙の形状などがより複雑な土壌に適用できるかどうかを検討する。試料として、関東ロームである筑波大学農林技術センターで採取した淡色黒ボク土（心土）と宇都宮大学清原農場で採取した表層多腐植質黒ボク土（作土）－以下、単に黒ボク土と書く－を用いた。このような土壌を用いたのは、淡色黒ボク土については、ガラスビーズ－単粒構造－などとは異なる構造－団粒構造－をもつ土壌に対してガラスビーズなどで得られた後退排水に関する知見が適用できるかどうかを確認したかったためであり、そのような土壌の代表として筑波大農林技術センターの淡色黒ボク土を用いた。また黒ボク土については、上述した理由に加え排水の主な対象が作土層であることを考えて、作土層で団粒の発達したものの代表として宇都宮大学清原農場の作土層－黒ボク土－を実験に供した。これらの土壌は、すでにその土壌物理性が詳しく研究されている<sup>45, 46, 47</sup>。

なお、これらの土壌を後退排水実験に供するためには不攪乱土を採土することが望ましいのであるが、技術的に困難であったので、攪乱土を充填して実験に供した。

## 2. 後退排水実験

### 1) 試料

淡色黒ボク土および黒ボク土の攪乱した未風乾試料を2 mmフルイでふるい分け、仮比重が一定になるように、内径5 cm、長さ100 cmの透明アクリル円筒に、それぞれ充填した。各々の土壌の物理性を、Table 6.1 に示す。なお真比重の測定では、100ml ゲーリュサック型比重びんを用い、真空法で気泡除去を行った<sup>49)</sup>。

Table 6.1 土壌物理性

	土性	真比重	充填時含水比(%)
淡色黒ボク土	HC <sup>45)</sup>	2.80	94
黒ボク土	LiC <sup>47)</sup>	2.53	51

### 2) 実験方法

実験装置および測定の方法は、第IV章のガラスビーズ・砂で行ったものと同じである。また、本章で用いた実験の条件を Table 6.2 に示す。淡色黒ボク土層および黒ボク土層では、後退毛管高  $h_c$  は



実験円筒壁面上の観察によっても平衡時の含水比測定による水分分布からも得られず，かわりに限界負圧  $h_a$  が求められたので，第IV章 3.4) で示した， $h_c = h_a$  の関係を使って， $h_c$  のかわりに  $h_a$  を用いた。 $h_a$  の測定方法は第IV章 2.3) に示してある。

Table 6.2 実験条件

		$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	L [cm]	$h_a$ [cm]	$h_o$ [cm]	$K_p$ [cm/s]	f [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	T [°C]
単層	淡色黒ボク土	0.52	40.5	37	-95	$3.1 \times 10^{-4}$	0.065	20
	黒ボク土	0.56	40	17	-77	$7.3 \times 10^{-3}$	0.030	21
成層	上層							
	黒ボク土	0.56	20	17		$9.5 \times 10^{-3}$	0.039	18
	下層				-40			
淡色黒ボク土	0.42	25	24		$7.9 \times 10^{-3}$	0.072		

$\rho_d$  : 充填仮比重， L : 試料層厚さ，  $h_a$  : 限界負圧，  
 $h_o$  : 排水位， T : 水温， f : 比産出量，  
 $K_p$  : T °C における浸透時透水係数。

なお，成層下層の淡色黒ボク土層の仮比重は単層の場合より小さくした。その理由は，単層充填時の仮比重で充填しようとするとき，均一な層にするのが困難で，密度の違う層の重なりになる傾向が強かったからである。すなわち，仮比重 0.52 [g/cm<sup>3</sup>] に充填するためには，かなり強い力で充填しなければならない。そのため充填表面の透水係数が著しく小さくなる。この部分だけをクギで刻みを入れ破壊しても，その影響は残り易い。そのような理由で，成層では，単層時よりゆるく充填した。

### 3. 実験結果と考察

#### 1) 単層の後退排水

##### (1) 充填淡色黒ボク土層の後退排水

後退毛管力  $h_{dc}$  の測定値を, Fig.6-1 に示す。Table 6.2 の実験条件から,  $h_c = h_a$  とすると,  $-h_o > h_c$  の条件にあり, したがって,  $h_{dc}$  は, (4.14)式から変化する条件にある。そこで, (4.14)式の  $\alpha$ ,  $\beta$  を(4.15)式, (4.16)式で求め, (4.14)式による計算値  $h_{dc}$  と測定値とを比較すると, Fig.6-1 のようにほぼ一致している。Y = 32 [cm]では  $h_{dc}$  の計算値と測定値は大きく異なるが, この圧力計は, 同一層で条件を変えて行った実験でも計算値と大きく異なっていたことから, 異常値を示したと思われる。

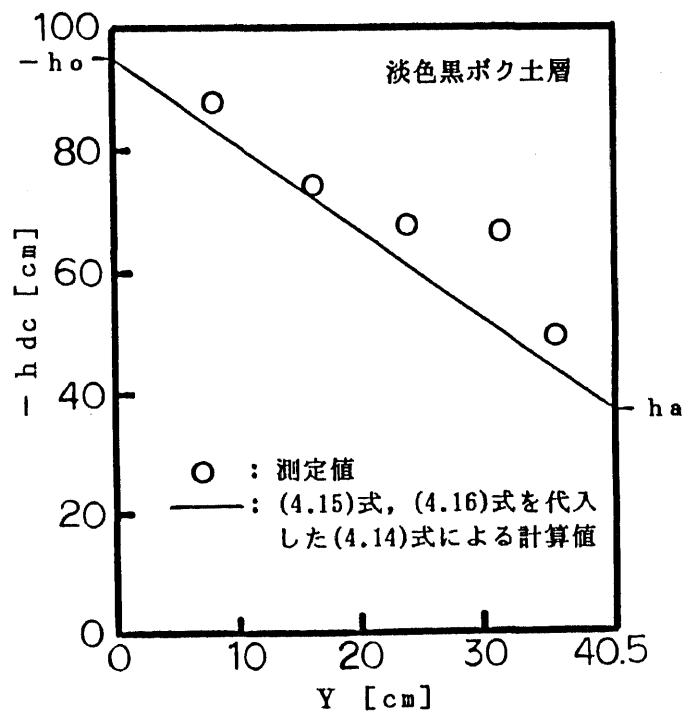


Fig.6-1 後退線の各位置 Y における後退毛管力  $h_{dc}$

以上のことから、単層の淡色黒ボク土層で現れる後退毛管力は、ガラスビーズ・砂の単層のそれと同じと考えてよい。そこで、(4.14)式に(4.15)式、(4.16)式を代入し、この式を(4.2)式に代入して整理すると、 $K_d = K_p$ 、 $h_c = h_a$ として、

$$q_d = K_p(L - h_o - h_a)/L \quad (\text{一定}) \quad (6.1)$$

が得られる。(6.1)式で計算した $q_d$ と測定値(4.1)式参照とを、Fig.6-2に示す。また、従来の仮定により $h_{dc} = -h_a$ (一定)として計算した値は、測定値と大きく異なることを示す。したがって、後退毛管力 $h_{dc}$ が変化することを考慮すれば、(4.2)式の後退排水式は、充填淡色黒ボク土層に適用できる。

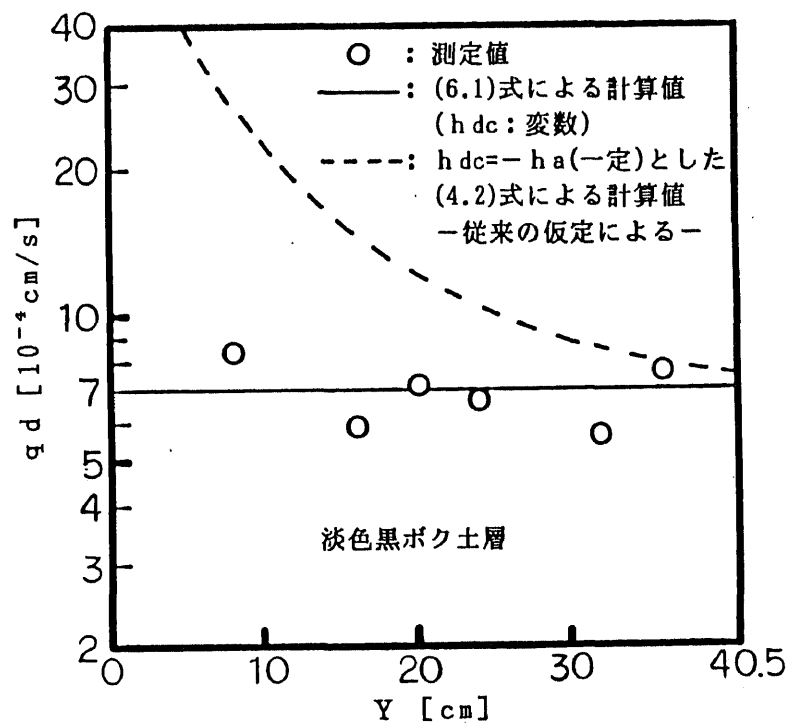


Fig.6-2 後退線の各位置Yにおける排水強度 $q_d$

次に、積算排水量  $Q$  と後退線の位置  $Y$  との関係を調べると、  
 Fig.6-3 に示すように直線関係にあるから、比産出量  $f$  は一定と  
 みなしてよい。したがって、後退線の位置  $Y$  と時間  $t$  の関係は、  
 (4.19)式に、 $K_d = K_p$  ,  $h_c = h_a$  を代入して求められると考えら  
 れる。そこで、この式で計算した  $Y$  と  $t$  の関係と実測値とを、Fig.  
 6-4 に示すと、これらはほぼ一致する。

以上のことから、充填淡色黒ボク土層で起こっている後退排水現  
 象は、ガラスビーズや豊浦標準砂の充填層におけるそれと同じと判  
 断される。

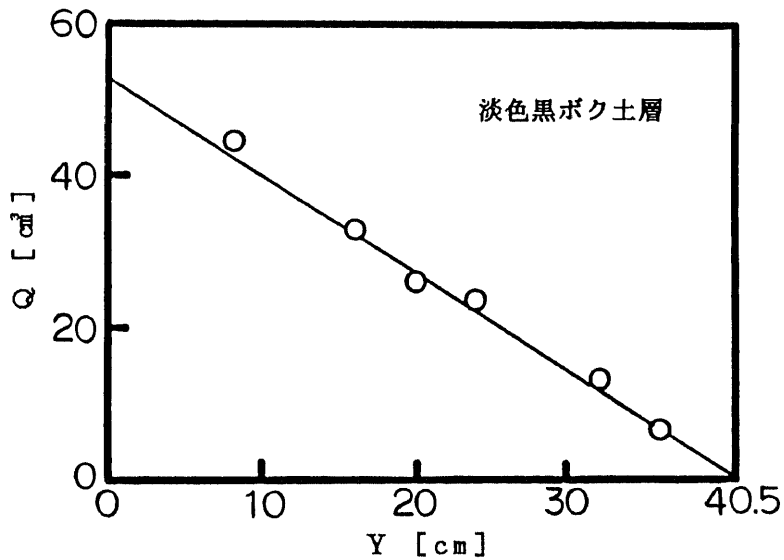


Fig.6-3 積算排水量  $Q$  と後退線の位置  $Y$  との関係

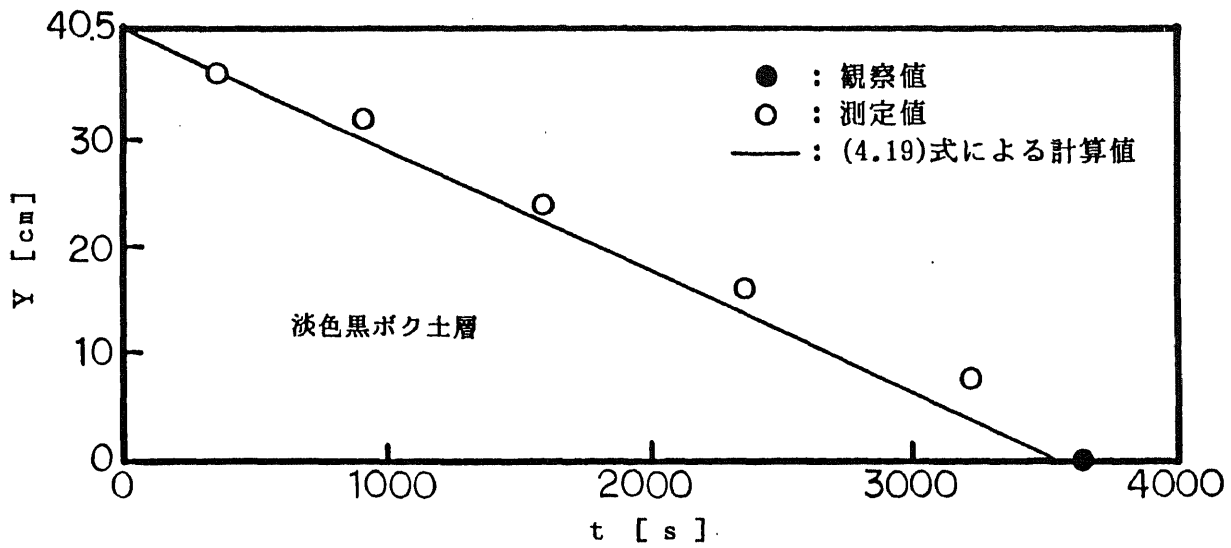


Fig.6-4 後退線の各位置  $Y$  における時間  $t$

## (2) 充填黒ボク土層の後退排水

黒ボク土層では，後退線が通過しても，その位置の圧力計は大気圧を示さない。すなわち，Fig.4-1 に示したような急激な圧力変化がない。そのため，後退線の位置や後退毛管力を測定することができない。これは，受感部に空気が侵入してこないためと考えられる。また，黒ボク土層では後退排水中の各位置の圧力水頭の変動が絶えず起こっている。そのため，測定した圧力水頭から，後退毛管力を推定することもできない。そこで，黒ボク土層では，後退線の位置，後退毛管力は測定できなかったが，排水量と時間の関係，層下端を後退線が通過する時の時間とこの時の積算排水量は測定してあるの

で、第IV章で得た知見を適用して、後退排水式が適用できるかどうかを確認して、後退線の移動を調べてみる。

まず、単層黒ボク土層では、Table 6.2 から、 $-h_o > h_c$  の条件にある。したがって、(4.14)式から後退毛管力  $h_{dc}$  は変化すると考えられる。ゆえに、(4.14)式の  $\alpha$ 、 $\beta$  をそれぞれ(4.15)式、(4.16)式で求めて、後退排水式をつくと、(6.1)式になる。すなわち、排水強度は時間に関係なく一定になる。この計算値と測定値とを Fig.6-5 に示す。両者はほぼ一致することがわかる。また、従来の仮定により  $h_{dc} = -h_a$  (一定) として、(4.2)式 -  $q_d$  と  $Y$  の関係 -、(4.18)式 -  $t$  と  $Y$  の関係 - とから  $q_d$  と  $t$  との関係を求めると、測定値と大きく異なる。

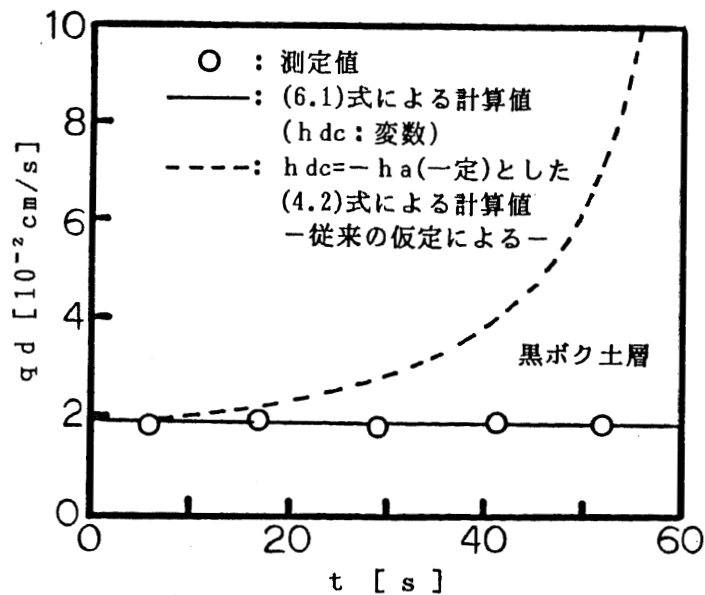


Fig.6-5 排水強度  $q_d$  と時間  $t$  との関係

次に、後退線が層下端を通過する時の積算排水量を試料層の厚さ  $L$  と試料層断面積  $A$  で除して比産出量  $f$  を求め、この比産出量と、 $K_d = K_p$ ,  $h_c = h_a$  - Table 6.2 参照 - を (4.19) 式に代入して、後退線の位置  $Y$  と時間  $t$  の関係を求めて、Fig.6-6 に示す。この計算による層下端の通過時間と測定値とを比較すると、両者は 8% 程度の差でほぼ一致するとみることができる。

以上のことおよび土壌間隙が均一であるという前提から、充填黒ボク土層における後退排水現象も、充填したガラスビーズ、砂および淡色黒ボク土の単層におけるそれと同じであると考えられる。

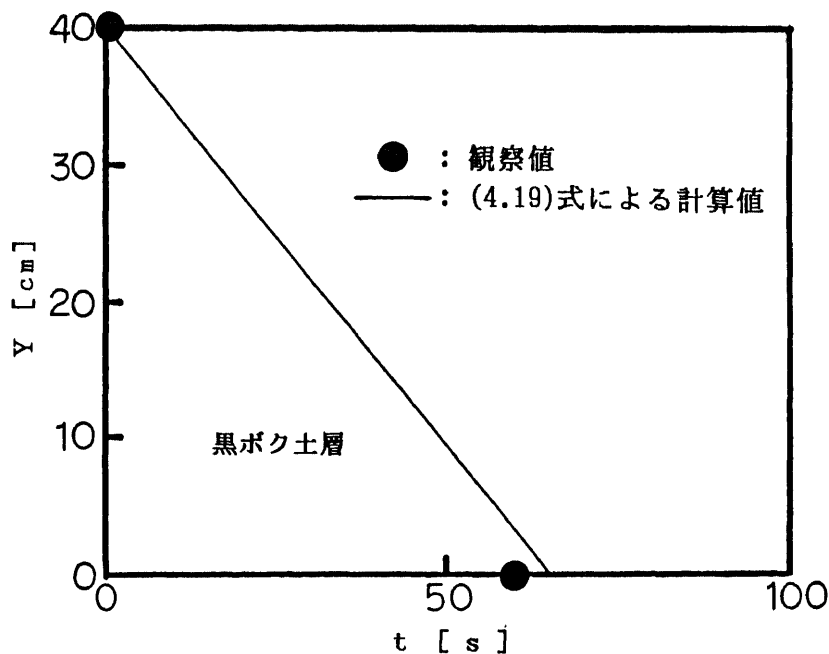


Fig.6-6 後退線の各位置  $Y$  における時間  $t$

## 2) 成層の後退排水

1). (2) の単層の黒ボク土層の後退排水の項で述べたように、充填黒ボク土層では、後退毛管力と後退線の位置を圧力計で測定することができない。そこで、成層の後退排水でも、排水強度と時間の関係を計算で求め、この計算値と測定値とを見ることによって、後退排水式が適用できるかどうかを検討する。次に、後退線の位置と時間の関係を計算で求め、下層の淡色黒ボク土層の測定値と比較してみる。

まず、(5.6)式に  $Kd_1 = Kp_1$  ,  $Kd_2 = Kp_2$  ,  $hc_1 = ha_1$  を代入して  $hp'$  を求めると、 $hp' = -24$  [cm] を得る。(5.2)'式、(5.3)'式 -P.51- より、上層黒ボク土層の後退毛管力を判別すると、  
 $-hp' > ha_1$  ( $ha_1 = 17$  [cm] - Table 6.2 -) の条件にあり、 $hc_1 = ha_1$  であるから、 $hdc_1$  は(5.3)'式で表せる。また、下層の淡色黒ボク土層では、 $hc_2 = ha_2 = 24$  [cm] であるから、下層下端の境界条件は、 $ho = -40$  [cm] (Table 6.2) より、 $-ho > hc_2$  の条件にある。下層上端の境界条件は、 $hdc_1 = hp' = -24$  [cm] であるから、上述した  $hc_2$  の値より、 $-hdc_1 = hc_2$  の条件にある。したがって、Table 5.2 から、 $hdc_2$  は変化する。この時、  
 $ha_1 < ha_2$  であるから、上層と下層の境界上部には、毛管懸垂水



は生じないので、(5.13)式で示した空気圧  $h_b$  の影響はないものと考えられる。ゆえに、 $h_{dc_2}$  の  $\omega$ 、 $\gamma$  は、それぞれ(4.15)式に  $\alpha = \omega$ 、 $h_c = h_{a_2}$ 、 $L = L_2$  を代入した式で、(4.16)式に  $\beta = \gamma$  を代入した式で表すことができる。すなわち、

$$h_{dc_2} = -\frac{h_o + h_{a_2}}{L_2} Y + h_o \quad (6.2)$$

を得る。(6.2)式と、 $h_b = 0$  を(5.14)式に代入して整理すると、

$$q_{d_2} = K_{d_2} \frac{L_2 - h_{a_2} - h_o}{L_2} \quad (\text{一定}) \quad (6.3)$$

が導かれる。そこで、(5.10)式で求めた上層黒ボク土層における排水強度、(6.3)式で求めた下層淡色黒ボク土層の排水強度と各層の測定値とを Fig.6-7に示す。両者はほぼ一致する。また従来の仮定により  $h_{dcn} = -h_{an}$  (一定)として計算した値は、測定値と大きく異なる。

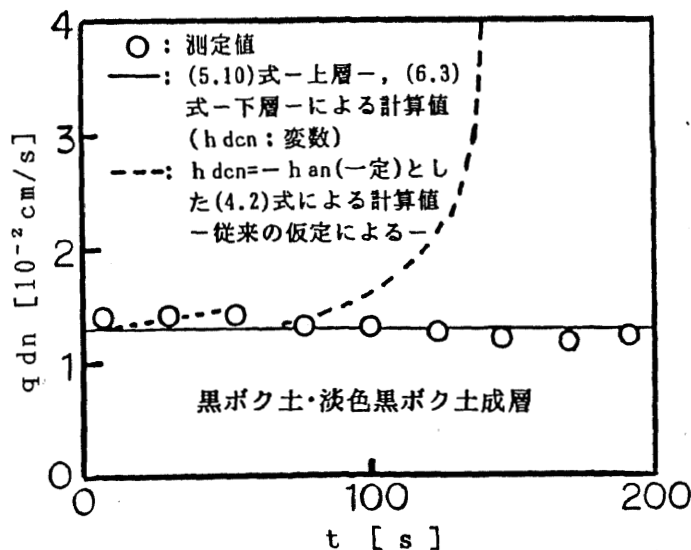


Fig.6-7 排水強度  $q_{dn}$  と時間  $t$  の関係

以上のことから、充填土の成層においても後退排水式は適用できる。そこで、次に後退線の位置  $Y$  と時間  $t$  の関係を求め、測定値と比較検討する。上層の場合、後退排水式として(5.10)式が適用できるので、 $Z$  と  $t$  の関係は(5.18)式で求められる。ただし、 $Kd_1 = Kp_1$  ,  $Kd_2 = Kp_2$  ,  $hc_1 = ha_1$  ,  $f_1 = 0.039$  - Table 6.2 - を用いる。下層については、(5.20)式に、(6.2)式から得る  $\omega = -(h_0 + ha_2) / L_2$  ,  $\gamma = h_0$  , Table 6.2 の  $f_2 = 0.072$  ,  $Kd_2 = Kp_2$  を代入した式で求める。これらの計算値と測定値とを、Fig. 6-8 に示す。なお、後退線が下層下端を通過する時の時間は観察により求めプロットした。これらは、ほぼ一致すると見ることができる。したがって、ガラスビーズの成層で得られた後退排水現象の知見は、充填した黒ボク土・淡色黒ボク土の成層にも適用できる。

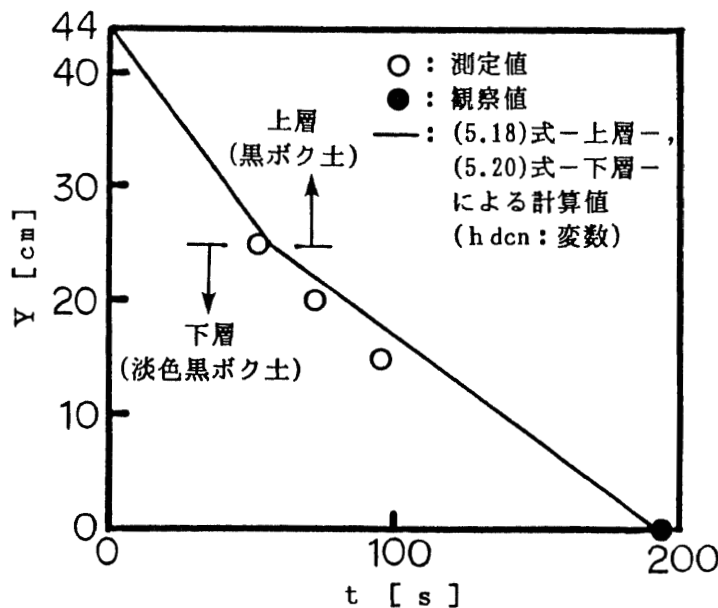


Fig.6-8 後退線の各位置  $Y$  における時間  $t$

#### 4. まとめ

ガラスビーズ・砂の充填土と異なり、黒ボク土層では、単層黒ボク土層の後退排水実験で述べたように、後退線の位置、後退毛管力を測定することができず—受感部に空気が侵入しないためと考えられる—、また後退排水中の各位置の圧力水頭は大きく変動する。この変動は、ガラスビーズ・砂ではほとんどなく— Fig.4-1 参照 —、淡色黒ボク土層では若干みられるが黒ボク土層ほどではない。

しかし、ガラスビーズ・砂で得られた後退排水式を適用して解析した結果は、充填土層の実際の現象とよく一致している。このことから、ガラスビーズ・砂の層で起こっている後退排水現象と、淡色黒ボク土および黒ボク土充填層で起こっているそれとは同じと考えられる。

本論文では結果として、ガラスビーズ・砂で得られた後退排水式が適用できる充填土を用いた。しかし、このような土壤にガラスビーズなどで得られた知見が適用できることを実験的に確認したことは、同様の土壤構造をもつ他の多くの土壤に適用できることを示すものと考えられる。今後、種々の土壤について後退排水実験を行い、黒ボク土層のように、後退線の位置および後退毛管力の測定ができない理由および後退排水中の圧力水頭が大きく変動する理由を明ら

かにすることが必要であろう。

## 第 VII 章 総括

汎用耕地化が進められるなかで、より高度な排水技術が求められるようになった。これに対応するためには、排水現象の基礎的な研究を行う必要がある。

そのような背景のもとで、畑作物の正常な生育にとって、湛水状態—これは、地表排水で対処するものとして—の次に危険と考えられる飽和状態からの排水を想定し、この排水現象を解明するために、できるだけ単純な条件のもとでガラスビーズ・砂の充填層について室内実験を行い、考察を加えた。その結果は、次のようにまとめられる。

1. 後退線および後退毛管力を定義し、それらを実測して、それらの定義と測定方法が有効であることを検証した。

2. 後退毛管力を実測することによって、従来一定と仮定されていた後退毛管力は、条件によって変数になることを明らかにした。

すなわち、後退毛管力  $h_{dcn}$  は、

1) 対象となる  $n$  層の上端に後退線があるときの  $n$  層内の各位置

の圧力水頭  $h(Y)$  が、

①  $n$  層の後退毛管高の負値 ( $-h_{cn}$ ) より大きいか等しい—

$h(Y) \geq -h_{cn}$  — 時、 $h_{dcn} = -h_{cn}$  (一定) である。

②  $h(Y) < -h_{cn}$  の時,  $h_{dcn} = h(Y)$  (変数) である。

ここで,

$$h(Y) = \{ (n \text{ 層上端での後退毛管力}) - (n \text{ 層の上端に後退線があるときの } n \text{ 層下端の圧力水頭}) \} Y / L_n \\ + (n \text{ 層の上端に後退線があるときの } n \text{ 層下端の圧力水頭})$$

$L_n$  :  $n$  層の厚さ [cm]

$Y$  :  $n$  層下端からの位置 [cm]

しかし,  $n$  層の上層の後退毛管高が  $n$  層のそれよりも大きい場合には,  $n$  層とその上層との境界上部に毛管懸垂水を生じて,  $n$  層の間隙空気圧が低下するために, ②の条件であっても,  $n$  層で測定した後退毛管力は, 上述した圧力水頭  $h(Y)$  よりも小さくなる。ただし, この空気圧の影響についての細かな検討は行っていない。

2)  $n$  層上端での後退毛管力は,  $n$  層の上層下端での後退毛管力の負値が,  $h_{cn}$  より小さいか等しいとき  $-h_{cn}$  であり,  $h_{cn}$  より大きいとき, 上層下端の後退毛管力に等しい。

すなわち, 2層の成層では,  $-\frac{1}{2}h_{dc1} \leq h_{c2}$  のとき, 下層上端の  $h_{dc2}$  は  $-h_{c2}$  になり,  $-\frac{1}{2}h_{dc1} > h_{c2}$  のとき, 下層上端の  $h_{dc2}$  は  $\frac{1}{2}h_{dc1}$  に等しい。

具体的な後退毛管力の区分方法は, 単層では, 試料層の後退毛管高  $h_c$  と排水位  $h_o$  との関係で,

$$-h_o \leq h_c \text{ のとき, } h_{dc} = -h_c \text{ (一定)} \quad (4.13)$$

$$-h_o > h_c \text{ のとき, } h_{dc} = \alpha Y + \beta \quad (4.14)$$

$$\text{実験的に, } \alpha = -(h_o + h_c) / L \quad (4.15)$$

$$\beta = h_o \quad (4.16)$$

と簡単に区分することができる。すなわち、単層の場合は、後退線が層の上端にある時、上端での後退毛管力  $h_{dc}$  は  $-h_c$  に等しく、下端の圧力水頭は  $h_o$  であるので、これらを結んだ直線が  $h(Y)$  になる。したがって、 $-h_o \leq h_c$  の条件は  $h(Y) \geq -h_c$  の条件であり、 $-h_o > h_c$  の条件は  $h(Y) < -h_c$  の条件になる。ゆえに、単層で示した  $h_{dc}$  の区分方法は、 $h(Y)$  と  $h_c$  の関係を簡単に示した方法である。また(4.15)式、(4.16)式で表した  $h_{dc}$  の式 - (4.14)式 - は  $h(Y)$  を表した式でもある。

2層の成層での後退毛管力の区分条件およびその値は、上層では、(5.6)式で求めた  $h_p$  の値 ( $h_{p'}$ ) と上層の後退毛管高  $h_{c_1}$  との関係で、

$$-h_{p'} \leq h_{c_1} \text{ のとき, } h_{dc_1} = -h_{c_1} \text{ (一定)} \quad (5.2)'$$

$$-h_{p'} > h_{c_1} \text{ のとき,}$$

$$h_{dc_1} = -(h_{p'} + h_{c_1}) Z / L_1 + h_{p'} \quad (5.3)'$$

と区分することができる。これは、単層での  $h_o$  を  $h_{p'}$  に置き換えたものである。

下層では Table 5.2 によって区分することができ、後退毛管力が一定である場合は、 $h_{dc_2} = -h_{c_2}$  であり、変化する場合の各位置の後退毛管力の値は、下層上端での後退毛管力と下層下端での圧力水頭  $h_0$  とを結んだ直線で表される（ただし、その直線で表す圧力水頭が  $-h_{c_2}$  より小さいときであり、 $-h_{c_2}$  より大きい圧力水頭の位置では、 $-h_{c_2}$  に等しくなる）。しかし、 $h_{c_1} > h_{c_2}$  の条件では、空気圧の影響がある。

3. 後退毛管力は条件によって変化するという 2. の結果を適用すれば、Darcy 型の後退排水式は、後退排水現象に適用できる。

4. 後退排水時透水係数は、浸透時透水係数に等しい。

5. 比産出量は一定と考えてよい。

1～5 のことから導いた後退線の移動－後退線の位置と時間の関係－を表す式は、実際の現象とよく合うことがわかった。また、これらの結果は、関東ローム－淡色黒ボク土、多腐植質黒ボク土－の充填土層で起こっている後退排水現象に適用できることがわかった。

以上が本研究によって明らかにされた事項である。

次に、残された問題について記述すると、まず後退毛管力が変化する理由については、解明することができなかった。また比産出量



については、後退排水実験を行って求めたが、 $pF$ -水分曲線など他の物理定数から求める方法を検討する必要がある。さらに、多腐植質黒ボク土では、圧力計により後退線の位置および後退毛管力を測定することができなかった。このことを含めて、他の種々の土壌について後退排水実験を行い、後退排水式の適用範囲を明らかにする必要もある。さらに、水田では一般に耕盤が存在し、この層が排水を著しく妨げるために、土中水は作土層を水平方向に移動することも考えられる。本研究では、鉛直方向の後退排水が主で、水平方向については閉鎖系についてのみ実験を行い、これは後退毛管力の区分条件を明らかにするためのものであった。上部が開放された系における水平方向の後退排水現象をも解明する必要がある。

本研究の結果に加え、上述したことを明らかにし、圃場における後退排水現象の実態を把握することによって、より合理的な圃場排水技術の確立が展望されるものと考ええる。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり，ご指導頂いた筑波大学農林工学系  
岸上定男教授，同 多田 敦助教授，またご教示頂いた農業土木試  
験場 岩田進午室長，茨城大学農学部 田淵俊雄助教授，宮崎大学農  
学部 武藤 勲教官，農業土木試験場 長谷川周一氏，同宮崎 毅氏  
に心から感謝する次第である。

さらに，実験を行うにあたり便宜を頂いた筑波大学農林工学系  
安部征雄講師，ご協力を頂いた同大学農地工学研究室の皆様にか  
ら感謝申し上げます。

## 引用文献

- 1) 農業土木学会：農業土木標準用語事典，農業土木学会，P.102（1983）
- 2) 多田 敦・豊満幸雄：畑地転換の排水をめぐる土壌学的諸問題，日本土壌肥科学雑誌，第52巻，第3号，PP.263~271（1981）
- 3) 冨田正彦・丸山利輔：転換畑作における農業土木的問題点の調査研究，農業土木学会論文集，第54号，PP.32~42（1974）
- 4) 冨田正彦：大区画水田転換畑における排水不良の実証的研究，農業土木学会論文集，第54号，PP.43~51（1974）
- 5) 渡辺春朗：田畑転換に伴う土壌の変化，土壌の物理性，第39号，PP.18~29（1979）
- 6) 汎用耕地化のための技術指針編集委員会：汎用耕地化のための技術指針，農業土木学会，PP.25~29（1979）
- 7) 高橋 強：排水路をへだてて水田地帯と隣接する畑地の地下水面形一転換畑の地下排水に関する研究（Ⅰ）一，農業土木学会論文集，第42号，PP.1~7（1972）
- 8) 長堀金造・高橋 強・天谷孝夫：隣接水田からの浸入水の影響とその対策一転換畑の地下排水に関する研究（Ⅳ）一，農業土木学会論文集，第64号，PP.7~13（1976）
- 9) 高橋 強・長堀金造・天谷孝夫：傾斜地水田地帯における畑地の地下水面形一転換畑の地下排水に関する研究（Ⅱ）一，農業土木学会論文集，第58号，PP.1~6（1975）
- 10) 高橋 強・長堀金造・天谷孝夫：傾斜地水田地帯における畑地の暗キヨ排水一転換畑の地下排水に関する研究（Ⅲ）一，農業土木学会論文集，第61号，PP.18~23（1976）
- 11) 山崎不二夫監修：土壌物理，養賢堂，P.102（1977）
- 12) 山崎不二夫監修：土壌物理，養賢堂，P.147（1977）
- 13) D. Hillel（岩田進午監修，高見晋一・内嶋善兵衛共訳）：土壌物理学概論一土と水の科学一，養賢堂，P.171（1984）
- 14) 山崎不二夫監修：土壌物理，養賢堂，PP.101~103（1977）
- 15) 浸透理論体系化研究グループ：土壌水運動理論の諸系列（2）一その内容と評価一，土壌の物理性，第15号，PP.33~40（1966）
- 16) 八幡敏雄：土壌の物理，東京大学出版会，PP.99~101（1975）

- 17) A. Klute : A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials, Soil Science, Vol.73, No.2, PP.105~116 (1952)
- 18) W. H. Green and G. A. Ampt : Studies on soil physics, Part 1— The flow of air and water through soils, Journal of Agricultural Science, 4, PP.1~24 (1911)
- 19) アー・イー・ブダゴフスキー (村本圭一・長田 昇・田淵俊雄共訳) : 土壌中への水の浸潤, 研究の資料と記録 (東京大学農学部土地改良研究室), 第9集, PP.1~93 (1959)
- 20) 田淵俊雄 : 浸潤とそれに続く浸透 (I) —均一乾燥砂層におけるタン水降下実験—, 農業土木研究別冊 1, PP.13~19 (1960)
- 21) E. G. Youngs : The drainage of liquids from porous materials, Journal of Geophysical Research, Vol.65, No.12, PP.4025~4030 (1960)
- 22) J. T. Ligon・H. P. Johnson・Don Kirkham : Unsteady-state drainage of fluid from a vertical column of porous material, Journal of Geophysical Research, Vol.67, No.13, PP.5199~5204 (1962)
- 23) E. C. Childs : The nonsteady state of the water table in drained land, Journal of Geophysical Research, Vol.65, No.2, PP.780~782 (1960)
- 24) M. E. Jensen・R. J. Hanks : Nonsteady-state drainage from porous media, Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, IR 3, PP.209~231 (1967)
- 25) M. Bybordi : The vertical movement of water in stratified porous material. 2. Transient stages of drainage to a water table, Water Resources Research, Vol.5, No.3, PP.694~697 (1969)
- 26) K. K. Watson・F. D. Whisler : Comparison of drainage equations for the gravity drainage of stratified profiles, Soil Science Society of American Journals, Vol.40, PP.631~635 (1976)
- 27) R. D. Jackson・F. D. Whisler : Equations for approximating vertical nonsteady-state drainage of soil columns, Soil Science Society of America Proceedings, Vol.34, PP.715~718 (1970)
- 28) P. R. Day・J. N. Luthin : A numerical solution of the differential equation of flow for a vertical drainage problem, Soil Science Society of America Proceedings, Vol.20, PP.443~447 (1956)

- 29) W. R. Gardner : Approximate solution of a non-steady-state drainage problem, Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 26, PP.129~132 (1962)
- 30) K. K. Watson : Experimental and numerical study of column drainage, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, HY 2, PP.1~15 (1967)
- 31) D. W. Zachmann · P. C. Duchateau · A. Klute : The calibration of the Richards flow equation for a draining column by parameter identification, Soil Science Society of American Journal, Vol.45, PP.1012~1015 (1981)
- 32) A. C. Liakopoulos : Theoretical solution of the gravity drainage problem, Journal of Hydraulic Research, 2, PP.50~74 (1964)
- 33) F. D. Whisler · K. K. Watson : One-dimensional gravity drainage of uniform columns of porous materials, Journal of Hydrology , 6, PP.277~296 (1968)
- 34) 豊満幸雄 · 多田 敦 : ガラスビーズ · 砂の単層における後退線の移動と排水式について一 閉鎖系における飽和状態からの排水に関する研究 (I) 一, 農業土木学会論文集, 第115号, PP.17~24 (1985)
- 35) 豊満幸雄 · 多田 敦 : ガラスビーズの成層における後退線の移動と排水式について一閉鎖系における飽和状態からの排水に関する研究 (II) 一, 農業土木学会論文集, 第118号, PP.1~8 (1985)
- 36) T. W. Lambe : Capillary phenomena in cohesionless soils, Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol.116, PP.401~423 (1951)
- 37) E. C. Childs : An introduction to the physical basis of Soil Water Phenomena, Wiley, P.333 (1969)
- 38) D. Hillel : Soil and Water, Academic Press, P.169 (1971)
- 39) H. Bouwer : Groundwater hydrology, Mc-Graw-Hill, P.28 (1978)
- 40) 八幡敏雄 : エヤー · バインディングによる土の透水性低下について, 研究の資料と記録 (東京大学農学部土地改良研究室), 第10集, PP.1~32 (1960)
- 41) J. B. Franzini : Permeameter wall effect, Transactions of American Geophysical Union, Vol.37, No.6, PP.735~737 (1956)
- 42) 土質工学会 : 土質試験法, 土質工学会, PP.363~369 (1981)
- 43) 山崎不二夫監修 : 土壌物理, 養賢堂, PP.109~110 (1977)

- 44) 田淵俊雄：粒子層における「浸潤と毛管力」，研究の資料と記録（東京大学農学部農地工学研究室），第19集，PP.1~122（1971）
- 45) 大羽 裕・永塚鎮男・富川昭男：農林技術センター用地の土壤の概況，筑波の環境研究1，PP.44~48（1976）
- 46) 遠藤良太・平山良治・多田 敦：筑波実験植物園の土壤の物理的性質－植栽基盤の水分環境とその改良法に関する研究（その1）－，筑波実験植物園研究報告2，PP.55~62（1983）
- 47) 山崎不二夫・八幡敏雄・須藤清次：関東ロームの物理的性質－とくにその水分をめぐって－，農業土木研究別冊，第7号，PP.1~13（1963）
- 48) 土質工学会：土質試験法，土質工学会，PP.645~646（1981）