

## 地下燃料貯蔵空洞への降雨・地下水流出の解析

## Hydraulic Analysis of Precipitation and Ground Water

### Run-off to A Large-Scale Fuel Store Cavern

埼玉大学工学部 正会員 佐藤邦明

国際航業（株） ○鎌田 烈

## はじめに

地下岩盤中に液化ガスや石油を貯蔵するための大規模地下空洞へは降雨や地下水が流出する。空洞内のガス圧変化によって地下水位・水頭分布形は変化し、それに伴ない地下水流出量も変化する。本研究は空洞内のガス圧変化による地下水面形と漏気帯の応答及び流出量の変化をヘル・ショウモデルと数値モデルによって明らかにしようとするものである。

地下燃料貯蔵空洞は上部半円，下部く形断面で建設されることが多く，長さは200～300mのものが大半である。そこで，本研究ではまず手はじめに，水平一様帯水地盤中にこのような断面をもつ水理モデルをヘル・ショウモデルと数値モデルで作成し，空洞内圧力を種々変化させたときの定常自由地下水位と流出量の関係を検討した。

### 1. ヘル・ショウモデル

今回用いたヘル・ショウモデルは図-1に示すように、前面がアクリル板であり、地盤の部分が $1020\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 、平板間隔 $2\text{ mm}$ とした。地下空洞は図中の中央に位置し、上部半円の半径は $30\text{ mm}$ 、下部断面は一辺 $30\text{ mm}$ の正方形とした。周囲の貯留部の条件は、ビニールホースで接続している外部のオーバーフローで一定に保った。粘性流体は、ビニールホースを通じて外部に排出させる。また、上部半円には空気流入・流出のためのビニールホースが外部から接続されており、空気流量が測定できるようになっている。

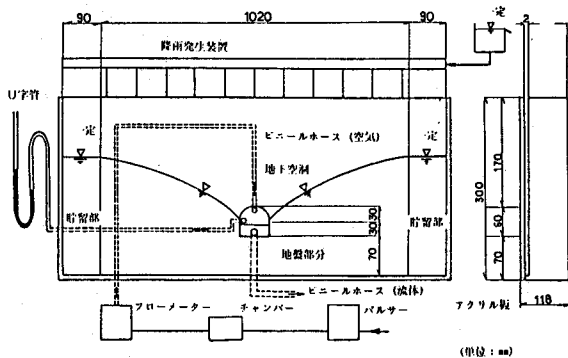


圖-1 實驗裝置略圖

## 2. ヘル・ショウモデルの実験結果

図-2はヘル・ショウモデル実験の諸元を示したものである。ここで  $h_a$  と  $h_b$  はそれぞれ貯留部の水位、 $l$  は地盤部分の水平長さ、 $D$  は空洞底面から、不透水基盤までの深さ、 $H$  と  $B$  はそれぞれ空洞下部断面の長さとし、 $r_o$  は上部半円の半径、 $\triangle h_o$  および  $\triangle h_b$  はそれぞれ空洞中心部直上部における水位低下量と、上部半円天端から地下水面までの距離を示している。

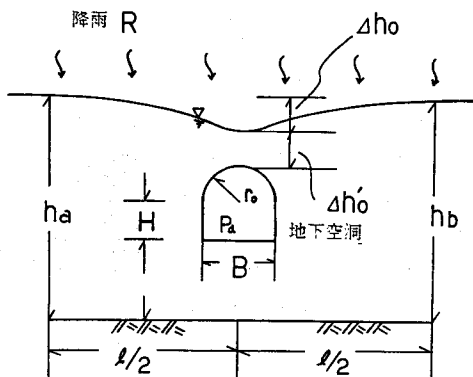


図-2 モデル実験の諸元

実験諸元を数値で示せば次のとおりである。

$D = 7.0 \text{ cm}$ ,  $B = 6.0 \text{ cm}$ ,  $H = 3.0 \text{ cm}$ ,

$r_0 = 3.0 \text{ cm}$ ,  $\ell = 102 \text{ cm}$

なお、図-1において空気はブロウアーから発生させ、チャンバーを通して脈圧をそぎ、フローメーターで流量を測定している。空洞内空気圧は図-1のマノメーターにて測定する。

実験は降雨浸透(R)の有る時と無い時の2つのケースについてそれぞれ空洞空気圧の有る時と無い時について行った。空洞空気圧は次式により、水頭( $\Delta h_a$ )に換算した。

$$\Delta h_a = Pa / \rho g \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ :水の密度、 $g$ :重力の加速度である。

また、降雨浸透はモデル上部に設置された細管を通じて地下水面に向けて一様に粘性流体を供給することで表わした。ここで、降雨浸透量(R)は、単位長さ当たり  $0.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  である。

なお、実験はすべて恒温室(20℃)で行った。

一連の実験に先立って、図-3及び写真-1に示すように、Dupuit流の状態を設定して、モデルの透水係数(k)を次式により算定した。

$$k = \frac{2 q \ell}{(h_a^2 - h_b^2)} \quad (2)$$

写真-1の状態です透水係数として  $0.963 \text{ cm/S}$  を得た。

モデルの初期条件は一樣な水位とし実験を行った。写真-2と写真-3は結果の一例を示したものである。

写真-2は降雨浸透がなく、空洞空気圧も無い場合であり、写真中のメッシュは  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  である。水位低下は約  $12 \text{ cm}$  で、浸出点が空洞下部側壁に現われ、空洞内水面との差が観察される。一方、写真-3は降雨浸透が有り空洞空気圧の有る場合で、空気圧による空洞直上部の水位上昇が観察できる。

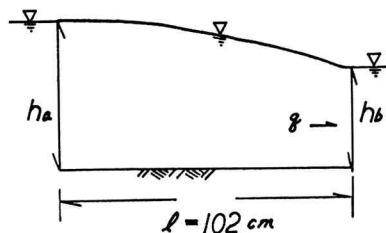


図-3 Dupuit 流による透水係数の計算

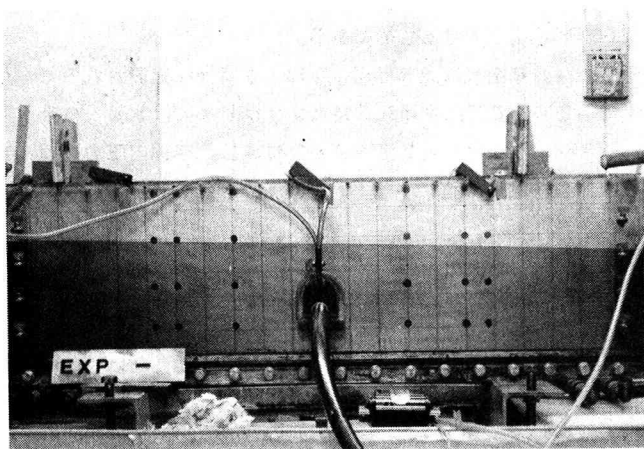


写真-2 Dupuit 流

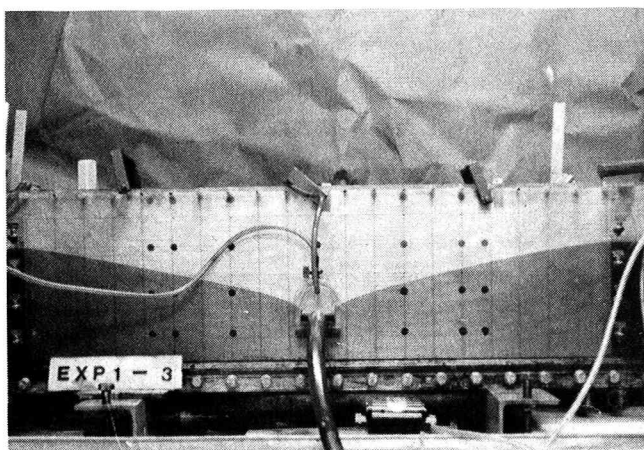


写真-2 降雨浸透、空気圧の無い場合

なお、写真にみられるように、モデル内空洞とガラス板の隙間からの漏気が生じている。

実験結果を整理すると、表-1及び表-2のようになり、これから流量と空洞直上部の水位の関係を求めると、図-4が得られる。なお、ここでは両者ともに無次元化して表示した。

図-4に示されるように降雨と共に流出量が増加するが、実験の範囲内でも空気圧の存在により、地下水流出が減少する傾向が認められる。

写真-3 降雨浸透有り，空気圧の有る場合

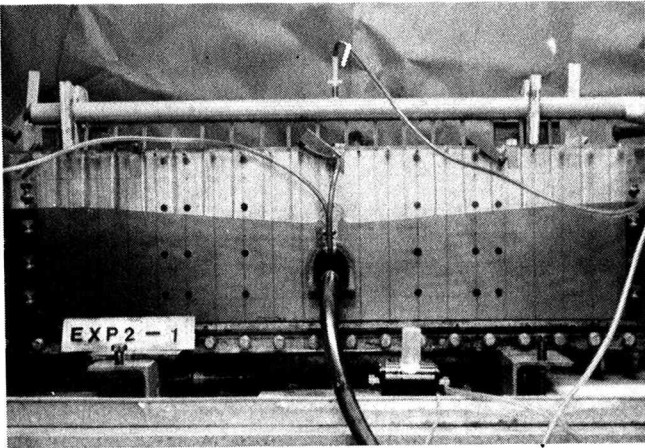


表-1 実験結果（降雨浸透の無い時）

表-2 実験結果（降雨浸透の有る時）

| Pa=0  |                  |                  |                  |                     |                   |
|-------|------------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| No.   | ha <sub>cm</sub> | hb <sub>cm</sub> | h0 <sub>cm</sub> | $2(ha-\Delta h0)/l$ | q <sub>cm/s</sub> |
| Exp-1 | 20               | 20               | 2.7              | 0.340               | 2.650             |
| Exp-2 | 20               | 20               | 8.0              | 0.235               | 5.650             |
| Exp-3 | 20               | 20               | 12.0             | 0.157               | 7.230             |

| Pa=0  |                  |                  |                  |                     |                   |
|-------|------------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| No.   | ha <sub>cm</sub> | hb <sub>cm</sub> | h0 <sub>cm</sub> | $2(ha-\Delta h0)/l$ | q <sub>cm/s</sub> |
| Exp-1 | 20               | 20               | 3.2              | 0.329               | 3.465             |
| Exp-2 | 20               | 20               | 7.0              | 0.255               | 5.381             |
| Exp-3 | 20               | 20               | 11.5             | 0.167               | 7.722             |

| Pa=0  |                  |                  |                  |                     |                   |
|-------|------------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| No.   | ha <sub>cm</sub> | hb <sub>cm</sub> | h0 <sub>cm</sub> | $2(ha-\Delta h0)/l$ | q <sub>cm/s</sub> |
| Exp-1 | 20               | 20               | 2.7              | 0.340               | 2.631             |
| Exp-2 | 20               | 20               | 8.0              | 0.235               | 5.610             |
| Exp-3 | 20               | 20               | 12.0             | 0.157               | 7.030             |

| Pa≠0  |                  |                  |                  |                     |                   |
|-------|------------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| No.   | ha <sub>cm</sub> | hb <sub>cm</sub> | h0 <sub>cm</sub> | $2(ha-\Delta h0)/l$ | q <sub>cm/s</sub> |
| Exp-1 | 20               | 20               | 3.2              | 0.329               | 3.402             |
| Exp-2 | 20               | 20               | 7.0              | 0.255               | 5.200             |
| Exp-3 | 20               | 20               | 11.5             | 0.167               | 7.615             |

### 3. 数値モデル

ヘル・ショウモデル実験の結果を確認するために、二次元定常浸透流の基本式をもとに数値モデルを作成した。基本式は周知のように次式で表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} (Kx \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (Kz \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \quad (3)$$

ここでKx, Kzはx, z方向の透水係数, hは水頭を表わす。解法は有限要素法を用いたが、(3)式を境界条件のもとに解くことは、変分原理によって次の汎関数を停留させるhの分布を求める問題と等価である。

$$F = \frac{1}{2} \iint_R \left\{ Kx \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + Kz \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 \right\} dx dz + \int_S V_n h s ds \quad (4)$$

ここで、Vnは境界から流出する法線方向速度、Sは境界の長さである。分割要素は三角形を用いた。

数値モデルの境界条件は、図-5に示すように自由水面、浸潤面、不透水境界面についてそれぞれ

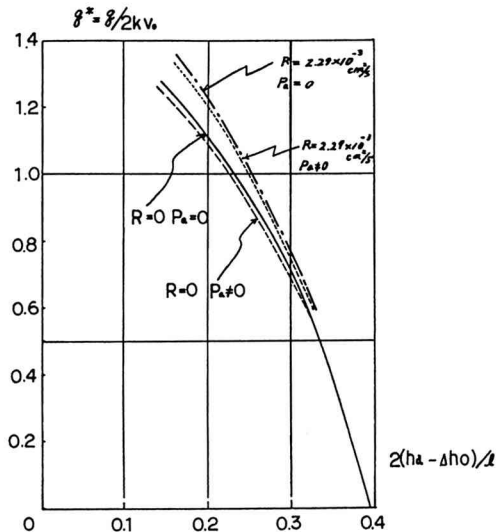


図-4  $q/2kro \sim 2(ha-\Delta h0)/\ell$ の関係

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial n} &= 0 \\ h &= Z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$h = Z + Pa/\rho g \quad (6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

とした。また、モデルの右端の境界水位は一定 ( $h_c$ ) とした。

ガスと水の2相界面挙動は、厳密には両者の基本式を連立させて解析すべきものであるが、今回は(3)式による自由地下水面が不透気境界をなすものと仮定をして、次式により空気流のフローパターンを求めた。

$$\frac{\partial^2 Pa}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Pa}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

ここで(8)式の境界条件は、空洞壁面、自由地下水面、及び不透気境界においてそれぞれ

$$P = Pa \quad (9)$$

$$\frac{\partial Pa}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

とし、地表面では  $P = 0$  とした。

計算手順は図-7のフローチャートに示される。

#### 4. 数値モデルの計算結果

ヘル・ショウモデル実験と同様に、降雨浸透の有る場合とない場合についてそれぞれ空洞空気圧の有る時と無い時の計算を行った。計算結果は表-3、表-4に示され、それぞれ次式に示すように無次元化した。

$$P^* = Pa/2ro \quad (11)$$

$$H^* = 2(ha - h_0)/\ell \quad (12)$$

$$Q^* = q/2kro \quad (13)$$

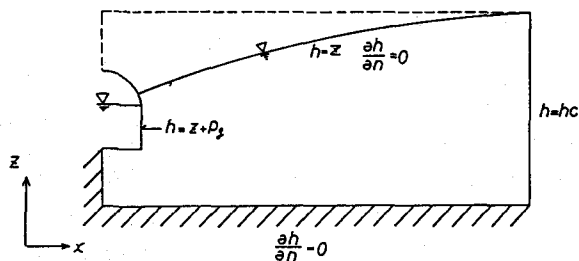


図-5 数値モデルの境界条件

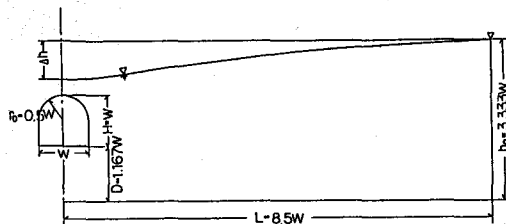


図-6 数値モデルの形状・寸法

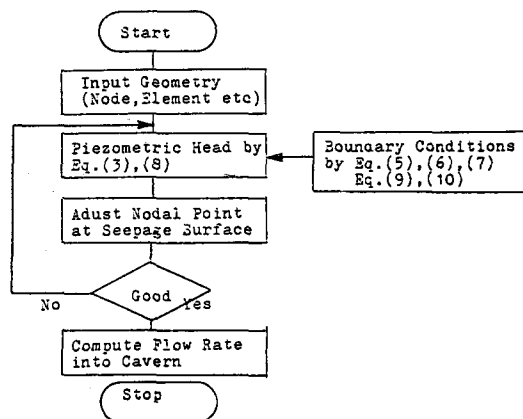


図-7 計算フローチャート

$Pa=0$

| No.   | $P^*$ | $H^*$ | $Q^*$ |
|-------|-------|-------|-------|
| Run-1 | 0     | 0.137 | 0.716 |
| Run-2 | 0     | 0.196 | 0.778 |
| Run-3 | 0     | 0.235 | 0.726 |
| Run-4 | 0     | 0.341 | 0.254 |
| Run-5 | 0     | 0.267 | 0.578 |

$Pa \neq 0$

| No.   | $P^*$ | $H^*$ | $Q^*$ |
|-------|-------|-------|-------|
| Run-1 | 1.0   | 0.360 | 0.216 |
| Run-2 | 0.667 | 0.323 | 0.356 |
| Run-3 | 0.333 | 0.284 | 0.490 |
| Run-4 | 0.008 | 0.235 | 0.720 |

$Pa=0$

| No.   | $P^*$ | $H^*$ | $Q^*$ |
|-------|-------|-------|-------|
| Run-2 | 0     | 0.196 | 0.792 |
| Run-3 | 0     | 0.235 | 0.744 |
| Run-4 | 0     | 0.341 | 0.268 |
| Run-5 | 0     | 0.267 | 0.594 |

$Pa \neq 0$

| No.   | $P^*$ | $H^*$ | $Q^*$ |
|-------|-------|-------|-------|
| Run-1 | 1.0   | 0.360 | 0.232 |
| Run-2 | 0.667 | 0.323 | 0.372 |
| Run-3 | 0.333 | 0.284 | 0.506 |
| Run-4 | 0.008 | 0.235 | 0.738 |

表-3 計算結果 (降雨浸透あり)

表-4 計算結果 (降雨浸透なし)

流量 ( $Q^*$ ) と水位 ( $H^*$ )

の関係を表わすと、図-8、図-9 のようになった。空洞内空気圧がない場合の計算例では、 $H^*$  0.2 付近で  $Q^*$  が最大になり、それ以下に水位が低下しても流出量が増加しないことが示されている。これは水位低下に伴う空洞壁面の透水断面積の減少に帰因するものと思

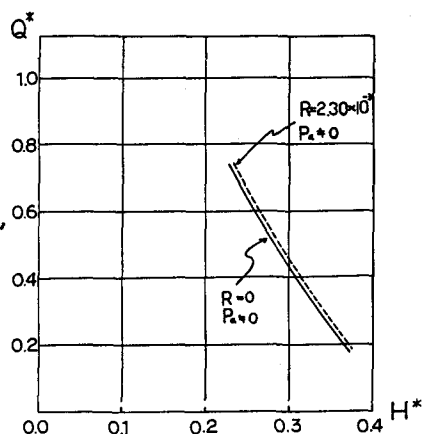
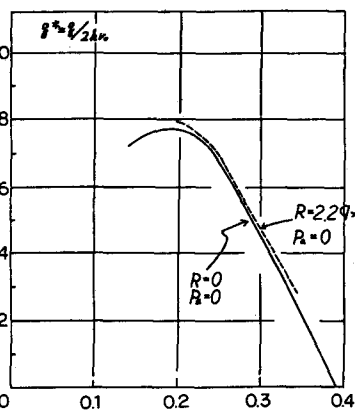


図-8  $Q^* \sim H^*$  の関係 (空気圧なし) 図-9  $Q^* \sim H^*$  の関係 (空気圧あり)

われる。ヘル・ショウモデルの結果と一致しないのは、どちらのモデルの計算にも、ヘル・ショウモデルで算定した透水係数を使ったことにも原因があるものと思われる。つまり、ヘル・ショウモデルでは空洞部を入れないで透水係数を算出しているの、入れた状態よりも大き目に求められているからである。いずれにしても定性的には両モデルの応答は一致していると考えられる。

図-10、図-11 には、それぞれ降雨の無い場合の定常自由地下水面の形状を、空気圧のある場合とない場合とにわけて表わした。空洞内空気圧の上昇に伴ない、空洞直上部地下水面の上昇が認められ、ヘル・ショウモデルの結果と一致する。

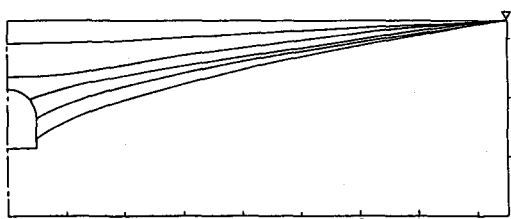


図-10 定常自由水面形 (空気圧無し)

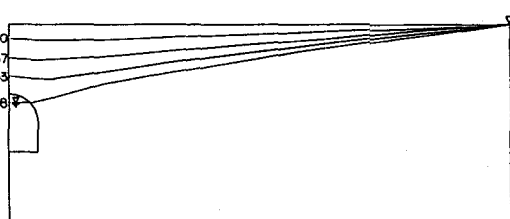


図-11 定常自由水面形 (空気圧有り)

## 5. 限界ガス圧及び空気流

無次元表示したガス (空気) 圧 ( $P^*$ ) と空洞直上部水位 ( $H^*$ ) の関係を数値モデルの結果から求めると、図-12 が得られる。図中の一点鎖線は、空洞上部半円の天端高の地下水位に相当する。この点をガスの漏気が始まる限界という意味で限界ガス圧と呼ぶことにすると、本計算例では 0.1 以下となる。今回の計算では空洞内液面高さは  $2.0W$  としており、ガスの存在する空間は極めて狭い。今後、種々の水理条件に対して漏気帯発生限界ガス圧を検討する必要があるが、本計算からその可能性が示唆されたものとする。

図-13 には、空洞周辺における地下水流と空気流のベクトル分布を示した。ガス圧の作用は空洞直上部とその周辺に強く、空洞から遠ざかるにつれて弱まるものと予

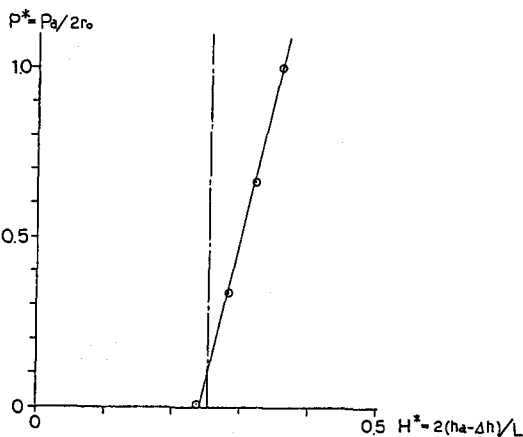


図-12  $P^* \sim H^*$  の関係

想されるが、本図は厳密な2相流計算に先立って、これら地下水流・空気流の挙動を定性的に把握するのに有用であろう。

#### まとめ

ヘル・ショウモデルにより、一様帯水地盤中の空洞への降雨・地下水流出がどのようになるかが定性的に把握され、次いで数値モデルによって実験結果を確かめることができ、以下の諸点が明らかになった。

(1) 降雨浸透により空洞への自由水面は上昇し、流出量が増大すること。

(2) 空洞内ガス圧の上昇とともに空洞直上部で水面形が上に凸となり、空洞への地下水流出量が減少すること、

(3) 漏気帯の発生限界ガス圧が試算できたこと、などである。今後は、種々の水理条件に対してガス-水2相流界面挙動を解析し空洞内ガス圧と浸出面移動や流出量との関係を把握していく必要があると考える。

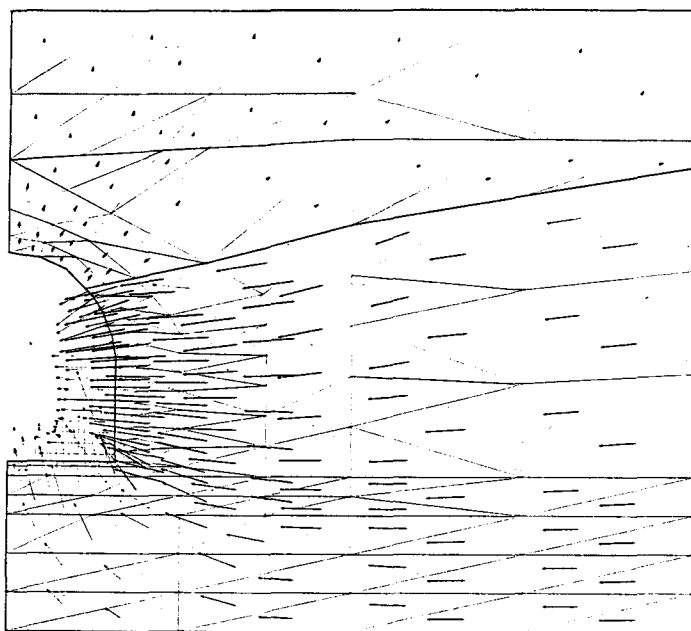


図-1 3 空洞周辺部の地下水流と空気流のベクトル分布

#### 謝辞

小論を発表するに当たり、数値計算の面で御協力を頂いた藤崎克博氏に厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 飯沢雅人・佐藤邦明；透水係数の動的変化を考慮した岩盤浸透流の解析，第25回水理講演会論文集，1981・2
- 2) Komata, H, K. Nakagawa, Y. Kitahara and M. Hayashi; Study on development in technique of unlined underground storage of petroleum, Rept. Central Inst. Elec. Power Industry, No. 378028, 1979 ( in Japanese )
- 3) Tanaka, S and S. Aki; Studies on technical development for unlined underground storage of fuel, Rept. Central Inst. Elec. Power Industry, No. 379006, 1979 ( in Japanese )