断 裂 系 モ デ ル と 圧 力 パ ル ス*

—シミュレーションによる動的挙動の解明—

藤永 好宣**・石井 吉徳**

(平成 3 年 5 月 15 日受付, 3 年 9 月 18 日受理)

Fractured Reservoir Modelling and Dynamic Response to Pressure Pulse —Estimation of Dynamic Behaviors by Numerical Simulation—

By

Yoshinobu FUJINAGA and Yoshinori ISHII

Abstract: This paper studies the response of fractured reservoirs to the pressure pulses. A numerical model is presented, which is applicable to simulate pressure behaviors of fractured media in three dimensions. This model consists of dual-porosity and dual-permeability in cell. The simulation of the pressure in the fractured reservoirs is formulated in a pair of differential equations treating fluid flow between rock frame and fracture. The paper describes dynamic behaviors of pressure pulses and discusses fundamental problems associated with injection rate and pulse duration. Also discussed are the effects of reservoir properties which respond to the applied pressure pulses. It is concluded the dynamic behaviors of pressure pulses in fractured reservoirs give useful information on reservoir properties.

1. 緒 言

地下のレザーバにおける流体の圧力挙動は貯留岩の物性値に関する重要な情報を含んでいる。この内、浸透率、孔隙率に関する情報は貯留工学的に貴重である。一般にレザーバ内の圧力計測よりこれらの物性値を求める方法¹⁾としては、1 坑井での圧力試験、坑井—坑井間の干渉試験、多坑井での観測値に対するヒストリマッチング、流体の圧入や生産を繰り返し、圧力パルスの振幅と時間的な遅れを計測するパルステスト等がある。このうち、パルステストは JOHNSON²⁾ ら (1966) によって始められたものであるが、最近では、Dake (1982)、LASSETER³⁾ ら (1988) の RFT (Repeat Formation Tester) による坑井間のキャラクタリゼーションが注目されている。

レザーバ内における流体の圧力は割れ目 (断裂)、断層または不浸透性の領域が存在する場合には特異な圧力挙動を示すと考えられる。よって、その圧力挙動の解析には実在のレザーバに合致した物理モデルおよび数値モデルの構築が必要となる。特に、断裂系のレザーバでは割れ目部分と岩石フレーム (割れ目を含まない岩石) 部分の流体の移動の取り扱いが問題となる。

WARREN and ROOT⁴⁾ (1963) は割れ目部分と岩石フレーム部分の流体の移動を疑似定常流とし、流体の流動と容量に関係した 2 つのパラメータを用いて、通常の片対数プロット (Horner type) で 2 つの直線間に中間領域のあることを示した。これは二重孔隙システムにおける代表的な圧力挙動と見なされている。

KAZEMI⁵⁾ (1969) は二重孔隙システムでの 2 次元モデルに関する研究を行い、WARREN and ROOT と同じ結論を得ている。

de SWAAN⁶⁾ (1976) は非定常理論のモデルによる圧力応答の解析を行っている。このモデルは割れ目内の流れのみを考え岩石フレームは割れ目システムに均質な分

* 平成 3 年 5 月 30 日第 56 回石油技術協会定時総会開発・生産部門シンポジウム「石油・天然ガスの開発と技術」にて講演
** 東京大学工学部

布する源泉 (source) としている。このため、圧力は後の期間で岩石フレームと割れ目の性質に依存する拡散係数により均質層と同様の作用になるとしている。

また、KAZEMI⁷⁾ら(1976)は3次元、二相流動に拡張して、割れ目部において水侵入の影響の強いことを示している。

SONIER⁸⁾(1988)は二重孔隙、二重浸透率の3次元、多相モデルを発表している。この研究は岩石フレームと割れ目間の流体の移動に重力の項を加えて、単一孔隙モデルと二重孔隙モデルについて生産挙動の相違を比較している。

一般に断裂系のレザーバは均質系のレザーバに比べて非常に異なる圧力挙動を呈するものであり、また遥かに複雑な構造をしている。この圧力挙動から物性値を求めるにはより実在のレザーバに近いモデルの構築が必要となる。しかしながら、これを数理モデル化するには単純化して解を求めなければならない。しかもそのモデルは断裂系の特性をよく表すものでなくてはならない。このような背景から本論文は1つのセルに2つの孔隙、2つの浸透率からなる単相、二重孔隙率、二重浸透率の断裂系のシステムを考え、割れ目のあるレザーバに流体をパルス状に圧入した場合の動的挙動について考察した。

通常、地層が成層構造をなしていれば物理探査の反射法によって弾性波速度に依存するレザーバの物性値を特定できる。また、坑井を利用したジオトモグラフィにより坑井間の物性分布を決めることができる。しかし、地熱フィールドなどのように断裂の多い領域では均質層に比べて物性が複雑で、レザーバの解明には流体パルスの圧力挙動の利用が期待されている。

2. 断裂系モデル

地下の岩体は割れ目を含んでいる場合がある。地熱の貯留岩は主に断裂系で構成されていると考えられる。また、油・天然ガスにおいても断裂系レザーバがある。これら岩石内の割れ目の大きさや分布の程度 (Fig. 1) は貯留岩の孔隙性、浸透性に関係するのでその取り扱いが問題となる。

断裂系のレザーバをモデル化する際には岩石フレーム部分と割れ目部分とでその物性が異なることに注目する必要がある。断裂系の特性としては割れ目部分の容積の占める割合は小さく、一方、割れ目部分の浸透率は岩石フレーム部に比べて非常に大きい。このため断裂系レザーバ内の流体は割れ目部分で流速が速く、岩石フレーム部分では遅い。しかしながら、岩石フレーム部分の容積は大きく、その流量は無視できないものと考えことにする。

Fig. 1 Stochastically distributed fractures in two dimensions.

Fig. 2 Conceptual model for naturally fractured reservoir.

Fig. 3 Schematic view of three-dimensional model.

本論文では断裂系モデルの構成 (Fig. 2) および挙動を次のように仮定する。

1. モデルは岩石フレーム部と割れ目部からなる。
2. 1つのセルに多数の岩石フレームおよび割れ目を含む。
3. 流体の流れは岩石フレーム部と割れ目部の両方に起こる。
4. 岩石フレーム部から割れ目部またはその逆への流体の移動がある。
5. 流体の流れは3次元的で流体の圧入、生産は割れ目部におこる。

流体は地熱地帯の熱水系を考え僅少圧縮性とした。また、今回は試験期間の比較的短い場合を考え温度変化はないものとし、流体の粘性は一定とした。3次元、格子モデルの一例を Fig. 3 に示す。各セル間では岩石フレーム部と割れ目部はともに連続している。岩石フレーム部と割れ目ではそれぞれ孔隙率、浸透率が異なる。

3. 数値モデル

前述のとおり流体は単相で僅少圧縮性としているので岩石フレーム部および割れ目部、各々について流動方程式^{4,9)}は後述する記号に基づき次のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} k_{mx} \frac{\partial P_m}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_{my} \frac{\partial P_m}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_{mz} \frac{\partial P_m}{\partial z} + k_m \alpha (P_f - P_m) = c \phi \mu \frac{\partial P_m}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} k_{fx} \frac{\partial P_f}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_{fy} \frac{\partial P_f}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_{fz} \frac{\partial P_f}{\partial z} - k_m \alpha (P_f - P_m) = c \phi \mu \frac{\partial P_f}{\partial t} \quad (2)$$

岩石フレーム—割れ目間における流体の移動は岩石フレームの浸透率と表面積に依存する。セル内の岩石ブロックを単純化して立方体とすれば孔隙率と浸透率 (Fig. 4) は岩石ブロックの大きさまたは割れ目幅に関係する (CRAFT, 1959¹¹⁾, REISS¹²⁾)。岩石ブロック幅を a , とすれば孔隙率と浸透率の関係 (付記参照) は次の式で表される。

$$k_f = 6.255 \times 10^9 a^2 \phi^3 \quad (3)$$

逆に、孔隙率と浸透率からブロックの大きさが求まる。係数 α については岩石フレームの大きさと表面積に依存する (形状との関係は WARREN and ROOT⁴⁾, KAZEMI⁷⁾ ら, SONIER⁸⁾ に詳しく述べられている)。ここでは SONIER と同様に岩石ブロック幅を一辺 a とし, $\alpha = 12(1/a^2)$ より求めた。また、式 (1), (2) の圧力値は非常に大きいので計算誤差を少なくするため、圧力差

$$\Delta P_m = P_m^{n+1} - P_m^n \quad (4)$$

$$\Delta P_f = P_f^{n+1} - P_f^n \quad (5)$$

を考えることにする。

式 (4), (5) を式 (1), (2) に代入し差分近似すれば、3次元のモデルは次の連立方程式で表される。

$$C e_{m,l} \Delta P_{m,i,j,k-1} + C g_{m,l} \Delta P_{m,i,j-1,k} + C a_{m,l} \Delta P_{m,i-1,j,k} + C b_{m,l} \Delta P_{m,i,j,k} + C b_{f,l} \Delta P_{f,i,j,k} + C c_{m,l} \Delta P_{m,i+1,j,k} + C f_{m,l} \Delta P_{m,i,j+1,k} + C h_{m,l} \Delta P_{m,i,j,k+1} = D_{m,l} \quad (6)$$

$$C e_{f,l} \Delta P_{f,i,j,k-1} + C g_{f,l} \Delta P_{f,i,j-1,k} + C a_{f,l} \Delta P_{f,i-1,j,k} + C b_{f,l} \Delta P_{f,i,j,k} + C b_{m,l} \Delta P_{m,i,j,k} + C c_{f,l} \Delta P_{f,i+1,j,k} + C f_{f,l} \Delta P_{f,i,j+1,k} + C h_{f,l} \Delta P_{f,i,j,k+1} = D_{f,l} \quad (7)$$

ここで $l=1, N$ 。

このように得られた方程式 (6), (7) を BSOR 法¹⁰⁾ によって解いた。収束判定は下記の2つの方法を用いた。

1. 計算した値がその1つ前の値に近づいた場合、
|(反復した-反復前の値)|/圧力値が 10^{-8} 以下。
2. 反復過程で変動が小さくなった場合、
最初の変動値の 10^{-2} 以下。

Fig. 4 Relationship between permeability and porosity.
Frame block size; m, fracture width; cm.

ただし、変動値が小さい場合は1/1.1以下にした。これは必ず反復計算を行い、また反復計算の過程で収束の割合が小さい場合に適度の反復計算になるように考慮したものである。計算はどちらかの条件を満足するまで繰り返す。

4. 流体の圧入と応答圧力の挙動

レーザーバ内の流体圧力は位置および時間の関数である。また、圧力は浸透率、孔隙率、圧縮率等のレーザーバの物性値および流体の性質に関係する¹³⁾。ここでは、断裂系のレーザーバを対象にして、流体の圧入率、圧入時間およびレーザーバの孔隙率と浸透率の変化に伴う圧力の動的挙動について考察した。概念的にはある坑井に水を圧入して他の坑井でその応答圧力を計測するシステムを想定している。

4.1 シミュレーション・モデル

地熱のレーザーバを開いた熱水系システムとすれば、その周辺とはっきりした区別は困難である。数値シミュレーションではモデルの境界で条件を設定するので、解はこの境界条件の影響を受ける。ここでは水平方向の圧力伝播を調べるため、数値モデルは水平方向に広がりのある3次元のモデルを考えた。その大きさは1辺2,000mの平面、200mの厚さを設定した。境界では流体の出入があるとした。実際のフィールドでは坑井を利用して圧力を観測するが、シミュレーションでの圧力はセルの平均値を表すので、計算した圧力の値を坑井の観測値に対応させるためにセル分割を小さくした。このモデルでは観測位置でのセルの大きさは1辺0.2mにし坑井で観測する圧力に対応するようにした。シミュレーションに使用した格子分割はFig. 5に示した。モデルの中心部に流体をパルス状に一定の期間、圧入、停止を繰り返す。このモデルは水平方向に比べて鉛直方向の厚さを薄くしたので、鉛直方向の浸透率は水平方向の1/10とした。計算に使用したレーザーバの基本的な物性値をTable 1に示す。

4.2 単一パルスの圧入

レーザーバに流体を圧入する場合、観測井での応答圧力は流体の圧入率、圧入期間およびモデルの物性値に依存する¹³⁾。ここではTable 1に示したレーザーバの物性値を用いて、一定の期間、水を圧入して基本的な応答圧力の挙動について考察した。

Fig. 6は圧入率 $0.02\text{m}^3/\text{s}$ 、圧入期間を1時間にした場合、圧入セルからの距離がX（水平）方向に各々20, 40, 60, 80, 100m離れた場所における応答圧力の時間的変化を示す。縦軸は初期圧力を基準にした圧力の変化値である。この場合、割れ目部の浸透率が大きいので

Fig. 5 Three dimensional grid system.
a) plan, b) cross views

Table 1 Basic characteristics of fractured reservoir model

Reservoir grid	22×12×5
Area, m ² (x=2,000, y=2,000)	4×10 ⁶
Thickness, m	200
Location of injection cell	(I=4, J=4, Z=3)
Frame porosity, fraction	0.2
Fracture porosity, fraction	0.005
Frame permeability, m ²	9.869×10 ⁻¹⁶
Fracture permeability, m ²	9.869×10 ⁻¹¹
$K_{f,x,y}$	9.869×10 ⁻¹¹
$K_{f,z}$	9.869×10 ⁻¹²
Fluid viscosity, Pa·s	0.001
Compressibility, Pa ⁻¹	2.069×10 ⁻⁸
Initial pressure (MPa)	
z=1	31
z=2	32
z=3	32
z=4	32
z=5	33

で応答圧力は低い。応答圧力の立ち上がる時間は圧入位置からの距離に関係する。通常、計測する地点の深度が深い場合、計測する圧力は高い。従って観測する地点での圧力変化が小さい場合には非常に高感度の計測器を必要とすることになる¹⁴⁾。またははっきりしたパルス応答を得るには圧入率や圧入期間が問題となる。次に、同じ圧入率で圧入期間6時間と12時間にした場合について、圧入セルからx方向に20m離れた距離での応答圧力を比較した (Fig. 7)。応答圧力の立ち上がり時期、圧力値

は同じであるが長い期間、圧入を続ければレザーバの圧力は上昇する。また圧入を停止することによりレザーバの圧力は減少する。一般に圧力を高くして、減衰が大きい程、応答側の圧力パルスの形状は明確になる。

流体の圧入率を大きくすればレザーバの圧力は上昇する。Fig. 8は圧入率 $0.02\text{m}^3/\text{s}$ および $0.06\text{m}^3/\text{s}$ にした場合である。流体の圧入を停止すれば応答圧力は減衰し始めるが、圧入位置からの距離が離れる程、応答圧力のピーク値は遅く現れる。

レザーバの浸透率が小さい場合も応答圧力は高くなる(Fig. 9)。圧入率を大きくする場合およびレザーバの浸透率が小さい場合、圧入位置での圧力は高い。圧入率

$0.06\text{m}^3/\text{s}$ 、割れ目部の浸透率1,000ダルシーでは圧入部分の圧力変化は73 KPa, 100ダルシーで728 KPaである。レザーバ内の応答圧力が高くなるのは圧入する側の圧力が高くなるのが主要因と考えられる。また、応答圧力の挙動は最初に急上昇し、以後徐々に高くなる傾向を示す。しかし、一定期間後に圧力変化はほぼ定常になる。これは圧入量と境界での流出の関係が平衡状態に近づいたと見なせる。境界で流れが無い条件の場合は圧入量に比例して応答圧力も上昇すると考えられる。

4.3 圧力パルスの応答特性

次に、複数のパルス圧力を発生した場合、その応答圧力の挙動を考察する。応答圧力のピーク値が高く、その

Fig. 6 Pressure variation in time.
Injection rate; $0.02\text{m}^3/\text{s}$, pulse duration; one hour.

Fig. 7 Effect of pulse duration on pressure response.
Distance 20m from injection cell.

前後の勾配が急な程、鋭いパルス形状になると考えられる。圧入する流体のパルス幅、パルスとパルスの間隔は応答圧力の形状に影響を与える重要な要因となる。また、岩石フレーム-割れ目間の相互作用もパルス形状に影響すると思われる。Fig. 10 は割れ目部の浸透率100ダルシー、流体の圧入率 $0.06\text{m}^3/\text{s}$ 、パルス幅3時間、パルス間隔を3時間とした場合の応答圧力である。圧入位置に近い程、パルス形状は明確である。距離が離れる程、ピーク値は低く、時間的に遅くなる。一般に、パルステストでは圧力減衰の途中から次の圧入の影響が現れるのでレザーバの圧力は上昇する傾向となる。Fig. 11 は圧入位置から20m離れた位置での岩石フレーム部分

と割れ目部分の応答圧力を示す。応答圧力の立ち上がり部分では割れ目部の圧力が高く、減衰する場合は岩石フレーム部が高い。最初は割れ目から岩石フレームへ流体が流れる。また、圧力の減衰は割れ目部で速く、岩石フレーム部から流体の供給があることを示す。

Fig. 12 は割れ目の浸透率を1,000ダルシーにした場合の応答圧力を示す。この図から100ダルシーの場合に比べて応答圧力は低く、応答はわずかに早い。これは浸透率の効果である。次に、岩石フレームの孔隙率を0.1にした場合の応答圧力をFig. 13に示す。応答圧力の形状はほとんど同じであるが、大きい圧力変化を示す。パルス圧入の期間を6時間にした結果をFig. 14に示

Fig. 8 Effect of injection rate on pressure response. Single pulse case.

Fig. 9 Effect of permeability on pressure response. Single pulse case, injection rate; $0.06\text{m}^3/\text{s}$, pulse duration; 12 hours.

Fig. 10 Pressure response in time.
Two pulses, injection rate; $0.06\text{m}^3/\text{s}$, pulse duration; 3 hours,
pulse interval; 3 hours, fracture permeability; 100 darcys.

Fig. 11 Comparison of pressure response between frame and fracture.

す。この結果、3時間の圧入に比べて、圧力変化は大きい。また、パルス形状は緩やかな立ち上がりを示している。

5. 結 論

流体圧入による圧力の挙動からレザーバの物性値に関する情報を得ようとする場合、その基本的な動的挙動を知ることが重要である。特に地熱のように複雑なレザーバでは、断裂系の作用を取り込んだモデルの構築が必要である。本研究では、断裂系のレザーバ・モデルとそのシミュレーションプログラムを作り、パルス圧入に関連する基礎的な研究を行い次のような結論を得た。

1. 応答パルスの形状は流体の圧入位置に近いほど鋭い。
2. 応答圧力は立ち上がり部分で岩石フレーム部に比べて割れ目部の方が高く、圧力の減少する部分では岩石フレーム部で高い。
3. レザーバが外に開いた系では流体の圧入の期間が長いと、応答圧力の変化は平衡状態となって一定値に近づく。
4. 応答圧力のピーク値は圧入位置からの距離が離れるに従って遅く現れる。
5. 同じ圧入率ではレザーバの浸透率が小さい程、圧入セルでの圧力が高い。また応答側の圧力変化も大

Fig. 12 Pressure response in time
Two pulses, injection rate; $0.06\text{m}^3/\text{s}$, pulse duration; 3 hours, pulse interval; 3 hours, fracture permeability; 1,000 darcys.

Fig. 13 Pressure response in time.
Two pulses, injection rate; $0.06\text{m}^3/\text{s}$, pulse duration; 3 hours, pulse interval; 3 hours, frame porosity; 0.1, fracture permeability; 100 darcys.

きい。

6. 割れ目部の浸透率が大さいと圧力の応答は早く現れる。

この結果、圧力パルスの動的挙動は断裂系レザーバの物性値に関する多くの情報を含んでいることが分かった。なを、境界が閉じていたりレザーバ内に不浸透性の領域がある場合、または物性値に異方性がある場合には異なる応答特性を示すことになる。ここで研究した圧力の動的挙動は圧力パルスの基礎的な応答特性である。一般的に断裂系の圧力パルスは均質系に比べて、応答圧力が低

い。また、圧力上昇が緩やかで圧力降下はゆっくり減衰するものと考えられる。その他圧力上昇曲線や圧力降下曲線では顕著な割れ目系の圧力挙動を示すことが知られている。しかし、応答圧力だけで決めるのは困難と思われるのでコア試験、検層、流速等から総合的に断裂系の存在を判断されればこのモデルの適用が有効とおもわれる。さらにこのモデルは観測データを基にした断裂系レザーバのキャラクタリゼーションに役立つものと考えている。

Fig. 14 Pressure response in time.

Injection rate; $0.06\text{m}^3/\text{s}$, pulse duration; 6 hours, pulse interval; 3 hours.

記号

- a ; 岩石フレームのブロック幅, m
 c ; 圧力率, Pa^{-1}
 Ca ; $\Delta P_{i-1,j,k}$ にかかる係数, m^3
 Cb ; $\Delta P_{i,j,k}$ "
 Cc ; $\Delta P_{i+1,j,k}$ "
 Ce ; $\Delta P_{i,j,k-1}$ "
 Cf ; $\Delta P_{i,j+1,k}$ "
 Cg ; $\Delta P_{i,j-1,k}$ "
 Ch ; $\Delta P_{i,j,k+1}$ "
 D ; 残分 (差分近似式の既知の項), $\text{m}^3 \cdot \text{Pa}$
 K ; 浸透率, m^2
 g ; 重力の加速度, m/s^2
 N ; 方程式の数
 P ; 圧力, Pa
 q ; 圧力率/レザーバの単位体積, s^{-1}
 t ; 時間, s
 x, y, z ; 距離, m
 ϕ ; 孔隙率, フラクション
 μ ; 粘土度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 ρ ; 密度, kg/m^3
 α ; 岩石ブロックの形状係数, m^{-2}
 添え字および肩文字
 m ; 岩石フレーム
 f ; 割れ目
 i ; x 方向の指数
 j ; y 方向の指数
 k ; z 方向の指数
 n ; タイムステップ

参考文献

- 1) MATTHEWS, C.S. and Russell, D.G., 1967: Pressure Buildup and Flow Test in Wells, Monograph Series, Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas.
- 2) JOHNSON, C.R., GREENKOM, R.A. and WOODS, E.G., 1966: "Pulse-Testing: A New Method for Describing Reservoir Flow Properties Between Wells" *J. Pet. Tech.*, Dec., 1599-1604.
- 3) LASSETER, T., KARAKAS, M. and SCHWEITZER, J., 1988: "Interpreting an RFT-Measured Pulse Test with a Three-Dimensional Simulator", SPE Formation Evaluation, March, 139-146.
- 4) WARREN, J.E. and ROOT, P.J., 1963: The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs", *Soc. Pet. Eng. J.*, Sept., 245-255.
- 5) KAZEMI, H., 1969: "Pressure Transient Analysis of Naturally Fractured Reservoirs with Uniform Fracture Distribution", *Soc. Pet. Eng. J.*, Dec., 451-461.
- 6) de SWAAN, A.O., 1976: "Analytical Solutions for Determining Naturally Fractured Reservoirs Properties by Well Testing", *Soc. Pet. Eng. J.*, June, 117-122.
- 7) KAZEMI, H., MERRILL, L.S. Jr., PORTERFIELD, K.L. and ZEMAN, P.R., 1976:

"Numerical Simulation of Water Oil Flow in Naturally Fractured Reservoirs", *Soc. Pet. Eng. J.*, Dec., 317-326.

- 8) SONIER, F., SOUILLARD, and BLASKOVICH, F.T., 1988: "Numerical Simulation of Naturally Fractured Reservoirs", *SRE Reservoir Engineering*, Nov., 1114-1122.
- 9) PEACEMAN, D.W., 1977: Fundamentals of Numerical Reservoir Simulation. ELSEVIER Scientific Pub. Corp., New York.
- 10) AZIZ, K. and SETTARI A., 1979: Petroleum Reservoir Simulation. Applied Science Pub. Ltd. London.
- 11) CRAFT, B.C. and HAWKINS, M.F., 1959: Applied Petroleum Engineering, Prentice-hall, Inc.
- 12) REISS, L.H., 1980: The Reservoir Engineering Aspects of Fractured Formations, Graham and Trotman Ltd.
- 13) BRINGHAM, W.E., 1970: "Planning and Analysis of Pulse-Tests", *J. Pet. Tech.*, May, 618-624.
- 14) HUTFILZ, J.M., COCKERHAM, P.W. and MCINTOSH, J.R., 1982: "Pulse Testing for Reservoir in a High-Permeability Environment", *J. Pet. Tech.*, Sept., 2179-2190.

付 記^{11, 12)}

Poiseuille の法則から導かれる一定の割れ目幅を流れる流量は

$$q = \frac{w^3 A \Delta P}{12 \mu L} \quad (\text{A-1})$$

である。ここで、

q ; 流量, cm^3/s
 w ; 割れ目幅, cm
 A ; 断面積, cm^2
 ΔP ; 圧力差, dynes/cm^2
 μ ; 粘度, poises
 L ; 長さ, cm

とする。他方, darcy の式から、

$$q = \frac{AK_f \Delta P}{\mu L} \quad (\text{A-2})$$

ここで、

ΔP ; 圧力差, atm
 μ ; 粘度, cp

とする。

単位を統一するため式 (A-1) に係数を掛ける。

$$q = \frac{w^3 \Delta P}{12 \mu L} \times 1.033 \times 10^8 \quad (\text{A-3})$$

割れ目の横幅 h とすれば、式 (A-2), (A-3) から割れ目の浸透率は

$$k_f = \frac{hw^3 \times 1.0133 \times 10^8}{12A} \quad (\text{A-4})$$

となる。

立方体の幅を a , 割れ目の幅を w とすれば

$$\frac{h}{A} = \frac{2}{a}$$

孔隙率は

$$\phi = \frac{3w}{a}$$

a の単位を m で表せば k_f は

$$k_f = 6.255 \times 10^9 a^2 \phi^3 \quad (\text{A-5})$$

となる。