Fracturing の際の砂の運動について*

柴 宮 博**

Movement of Hydraulic Fracturing Sand*

by Hiroshi Shibamiya**

Summary : Hydraulic fracturing makes the very permeable channel, where the fracture is created in the reservoir formation by the injection of fluid suspending sand with high pressure and high rate and then the opening of fracture is filled up with sand carried in the fracturing fluid, for the purpose of elevating the productivity or flowing capacity of oil reservoir. Therefore, the study on the movement of sand during the fracturing procedure, especially transportation and deposition of sand in the fracture opening, is thought to be very useful for understanding of fracturing process and promoting its effectiveness.

This paper states, first, the experimental and theoretical studies on the precipitation of sand grains in the non-flowing fluid and experiment of sand movement in the flowing fluid in the fracture opening, which is represented by the model apparatus. The sand mixed in the flowing fluid precipitates and deposits to the bottom of channel because of gravity segregation, when the flow rate is low. But when the flow rate reaches to the certain degree, the equilibrium is obtained such as no more precipitation of sand occurs nor the previously deposited sand moves. The velocity of this state is defined as equilibrium velocity. This paper reveals the equilibrium velocities, which are obtained experimentally for sands in water, medium weight crude oil and the gel fluid and discussion about movement and deposition of sand in the fracture opening by application of those data. Furthermore, a few points, which should be considered carefully at the fracturing practices, are induced.

1. 緒 言

Hydraulic Fracturing は、圧入流体に砂を混入、懸垂し、これを高圧高速で油層に圧入して、油層にキ裂を生じさせるとともに、キ裂の中に流体によって砂を運び込んで充テンして、キ裂が復元閉ソクするのを防いで、浸透性の大きい通路を油層内に作ることによって油層の産出能力を高めることを目的としている。したがって Fracturing 作業中の砂の動き、特にキ裂の中にはいつからの砂の流動状況を検討することは、Fracturing の実態を把握し、その効果の増大を計る上に最もたいせつな問題の一つであると考えられる。しかしながら、キ裂の中における圧入流体の流動状態は、きわめて複雑であり、したがって砂の流動状態もまた解析がきわめて困難であるので、本文では問題をきわめて単純化した状態のもとに仮定して検討し、また地層のキ裂に類似した装置を作って、その中で砂を流動させて実験し、これによってキ裂内における砂の運動に関してなんらかの傾向を求めることにつとめた。もちろん、まだ実験の範囲は狭く、検討も基礎的な範囲を出ないものであるけれども、いちおうの基礎的なまとまりはつけられたものと思う。将来は、本文において検討した結果を実際の作業に反映させ、また実際の作業より得た経験によってこの問題の解析をさらに深くかつ広く押し進めてゆきたいと考えている。

2. フラク砂の静止流体中における沈降について

Fracturing 作業中のキ裂内において流動中の砂に働く力は、二つの分力をもっている。その一つは重力の作用で下方に向う分力であり、他の一つはキ裂内を流れる流体の流れによって水平方向に動こうとする分力である。フラク流体によって運ばれた砂が、キ裂の中に沈着しタイ積して sand bed を作るのは、すべてこの下方に向う分力によっておこるのである。したがって、Fracturing 作業中の砂の流動状態を明らかにするためには、まず静止流体中における砂粒の沈降状態から検討することが必要となってくる。

2.1 静止流体中の砂粒の沈降速度の測定

フラク砂が静止している流体中をいかなる速度で沈降するかについて実測した。

試 料

フラク砂として使用されている久の浜ケイ砂の 20~30 メッシュ、30~40 メッシュとして調製されたものを、重量比で 1:1 の割合で混合し、ASTM No. 20~40 の標準フルイで六つのグループにフルイ分けしたものを使った。

実験装置

図 1 に示すように適当な刻線を施したガラス円筒を用いて、砂粒を 1 粒ずつ落下し、刻線を通過するに要した所要時間をストップウォッチで測定した。

実験方法

* 昭和 35 年 10 月 17 日受理

** 帝国石油株式会社 Teikoku Oil Co., Ltd.

図1

(1) 水中の沈降速度測定

(イ) 第1の刻線より50 cm沈降する所要時間と、1 m沈降するそれとを測定、後者が前者の2倍にあたるかを調べた。

(ロ) 五色砂といわれる久の浜ケイ砂を色別に選別し、各粒径、各色ごとに粒子20コあてを水中に沈降させて、その沈降速度を測った。

(2) 軽油中の沈降速度の測定

(イ) 軽油の比重および粘度の測定(オストワルド粘度計 No. 23)

(ロ) 50 cmの軽油中を砂粒1粒ずつ落下させ、所要時間を測定、沈降速度を算出した。各大きさの砂粒について20コずつの粒を用いた。

実験結果

(1) 水中の沈降速度

ストップウォッチ2コを用い、砂粒1粒が第1の刻線を通過して50 cm沈降する時間と、1 m沈降する時間を記録し、後者が前者の2倍であることを確認した。なおこの実験によって、沈降する粒子が水中で定常落下速度に達するに要する時間は意外に早く、またその距離は約10 cmで足りることもわかった。

各粒径、各色別の砂の沈降所要時間およびその速度は表1のとおりである。

表1 砂の水中の沈降速度実測値(測定時の水温14.5~17.0°C)

メッシュ	粒径 cm	砂が1mの水中を沈降する 所要時間				平均 所要時間 sec	水中の沈降 速度	
		白色透明 sec	白色不透明 sec	黒色 sec	その他 sec		cm/sec	ft/m
20	~0.084	8.7	9.2	8.1	8.5	8.6	11.6	22.8
25	0.084~0.071	9.5	9.1	9.4	9.1	9.3	10.8	21.2
30	0.071~0.059	11.4	11.0	10.6	10.0	11.0	9.1	17.9
35	0.059~0.050	13.7	13.3	13.0	13.1	13.3	7.5	14.8
40	0.050~0.042	15.8	15.5	15.5	16.1	15.7	6.4	12.6
40+	0.042~	18.8	18.3	16.4	19.0	18.2	5.5	10.8

(2) 軽油中の沈降速度

軽油の粘度は、オストワルド粘度計 No. 23を用いて、各温度において5回測定し、平均値を求めた。

表2 軽油の粘度と比重実測値

温度 °C	12.5	14.5	20.5
軽油粘度ポイズ	0.0214	0.0195	0.0146
比重	0.812		

軽油中の砂粒の沈降速度の実測には、砂粒を色分けすることなく、各粒径の試料20粒ずつを用いて、軽油中を砂粒が50 cmと1 m沈降するに要する時間を測定した。測定結果は表3のとおりである。

表3 砂の軽油中の沈降速度実測値

フルイ番号	沈降所要時間		沈降速度	
	50 cm(sec)	1 m(sec)	cm/sec	ft/m
20	4.2	8.4	11.9	23.4
25	5.0	10.0	10.0	19.7
30	5.4	10.8	9.3	18.3
35	6.4	12.8	7.8	15.3
40	8.0	16.0	6.3	12.4
40+	9.1	18.2	5.5	10.8

2.2 液体中の砂の沈降速度の計算法

流体の中で運動する粒子の運動に対する流体の抵抗を f とすれば、レイノルズ数 $2rV\rho_2/\mu < 1$ のときにはストークスの法則

$$f = 6\pi r\mu V \quad (1)$$

が成立するが、 $2rV\rho_2/\mu = 30 \sim 300$ の場合にはアレンの法則

$$f = \frac{5}{4}\pi(2rV)^{1.5}(\rho_2\mu)^{0.5} \quad (2)$$

が成立する¹⁾。ここに、 f は流体の抵抗(ダイン $\text{g}\cdot\text{cm}/\text{sec}^2$)

r は球の半径(cm)

μ は液体の粘度(ポイズ $\text{g}/\text{cm}\cdot\text{sec}$)

V は粒子の速度(cm/sec)

ρ_1 は粒子の密度(g/cm^3)

ρ_2 は流体の密度(“)

g は重力による加速度(cm/sec^2)

2.2.1 粘度の小さい流体中の砂の沈降速度の計算

レイノルズ数を計算したところ約100であったから、これは中間粒子として、前記の(2)式を適用する。粒子に対する下向きの力は $4/3\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g$ であるから、

$$\frac{5}{4}\pi(2rV)^{1.5}(\rho_2\mu)^{0.5} = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g$$

$$\left(\frac{5}{4}\right)^2(2rV)^3(\rho_2\mu) = \left(\frac{4}{3}\right)^2r^6(\rho_1 - \rho_2)^2g^2$$

$$V^3 = \frac{16}{9}r^3(\rho_1 - \rho_2)^2g^2$$

$$V^3 = \frac{25}{16} \times 8 \times \rho_2\mu$$

$$V = \left\{ \frac{16 \times 16}{25 \times 8 \times 9} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2)^2 g^2}{\rho_2 \mu} \right\}^{1/3} r$$

$$= \left\{ \frac{4}{225} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2)^2 g^2}{\rho_2 \mu} \right\}^{1/3} 2r \quad (3)$$

計算にあたっては、砂粒の形は完全球体であると仮定し、また温度による密度の変化は無視した。使用した数値は次のとおりである。

粒径 $d = 0.042 \sim 0.084 \text{ cm}$

落化球体(砂粒)密度 $\rho_1 = 2.64 \text{ g}/\text{cm}^3$

液体の密度 ρ_2 は水=1.00, 軽油=0.81, 八橋原油=0.84 g/cm³

液体の粘度 μ は水=0.01, 軽油=0.015, 原油=0.042 g/cm²sec

計算結果は表4のとおりであった。

表4 粘度の小さい流体中の砂の沈降速度の計算値と実測値との比較

フルイ番号	砂粒直径	計算による定常落下速度 cm/sec	実測値	
20°C の水中における定常沈降速度				
20	~0.084	~13.94	11.6	22.8
25	0.084~0.071	13.94~11.78	10.8	21.2
30	0.071~0.059	11.78~9.79	9.1	17.9
35	0.059~0.050	9.79~8.30	7.5	14.8
40	0.050~0.042	8.30~6.97	6.4	12.6
40+	0.042~	6.97~	5.5	10.8
20°C の軽油中における定常沈降速度				
20	~0.084	~14.08	12.2	23.4
25	0.084~0.071	14.08~11.90	10.0	19.7
30	0.071~0.059	11.90~9.99	9.3	18.3
35	0.059~0.050	9.99~8.38	7.8	15.3
40	0.050~0.042	8.38~7.04	6.3	12.4
40+	0.042~	7.04~	5.5	10.8
23.5°C の八橋原油中における定常沈降速度				
20	~0.084	~9.74	実測できず	
25	0.084~0.071	9.74~8.24		
30	0.071~0.059	8.24~6.84		
35	0.059~0.050	6.84~5.80		
40	0.050~0.042	5.80~4.87		
40+	0.042~	4.87		

以上の結果により、水中および軽油中における砂粒の沈降速度の計算値と実測値が比較的良好に一致していることがわかる。図2に軽油および原油(23.5°C)中の砂の沈降速度の計算値と砂の粒径との関係を図示した。これらはいずれも直線関係にある。

図2 砂粒の粒径と沈降速度との関係

2.2.2 粘度の大きい流体中の砂の沈降速度の計算

比重 0.933, 粘度 150 cp の重油の中を砂を沈降させる場合を考えることにし、まずレイノルズ数を計算するとこれが約 0.7 となり、1 よりも小さい値なので、ストークスの法則が適用されることを知る。したがって

$$f = 6\pi r\mu V$$

したがって前節の場合と同じように

$$6\pi r\mu V = 4/3\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g$$

$$\text{ゆえに, } V = \frac{2gr^2(\rho_1 - \rho_2)}{9\mu} \text{ (cm/sec) } \dots\dots\dots (4)$$

この式によって各サイズの砂が、比重 0.933, 粘度 150 cp の重油の中を沈降する場合の沈降速度を計算すれば表4のとおりである。

表4 原油中の砂の沈降速度

フルイ番号	沈 降 速 度	
10	2.52 cm/sec	4.96 ft/min
16	0.89	1.75
20	0.44	0.87
25	0.32	0.63
30	0.22	0.43
40	0.11	0.22

3. キ裂内における砂の流動について

キ裂の中に、砂と流体がある一定のレートで圧入され流動している場合の、砂の運動について考える。流体の中の砂は比重が大きいため、流体の中で沈降して底に沈む。流動中の流体の中の砂は必ず沈降する。たとえ静止状態では全く砂が沈まないようなゲルの中でも、このゲルが流動中には砂は沈降する。さて、最初流体のキ裂内の流速が小さいときには、砂はしだいにキ裂の底に沈んでたまり、だんだん積ってキ裂の断面積を縮めるので流体の流速はそれに伴ってしだいに速くなり、流速がある限界点に達すると、それ以後に流入した砂は全部流体とともに流れ去るようになるが、先に沈殿している砂はその場所から動かない。このとき砂の混合率を増減せず、流体の圧入レートを増加して、キ裂内の流速を大きくしてやると、先に沈殿していた砂が少しずつ流れ去り、しだいに流動断面積が大きくなる。かくして流速がしだいに小さくなって、ついにある限界点に達すると、流入する砂は全部流れ去るが沈殿していた砂はそれ以上は流れなくなる。このように砂の流動に対してある限界速度があることが認められるが、この限界点というのは、そのときの流動系統が自動的に求めたところの平衡点であって、したがってこのときの速度を平衡速度 (equilibrium velocity) という。平衡速度は、流体の比重、粘度、砂の大きさ、比重およびその混入率によって影響をうけるものと考えられる。

3.1 水を流体とした場合の平衡速度の実験

3.1.1 装置および実験方法

キ裂の中の砂の流動状況を見るための実験として、地層のキ裂に類似したものを作り、この中で砂を流動させて実験した。砂の流動状況をよく見ることができるようには、キ裂は水平のものよりも垂直のもののほうが都合がよいので、垂直キ裂の模型を作った。実験装置の略図を図3に示すが、無色透明のアク

図3 実験装置

リル樹脂板を2枚、間隔1cmで平行して垂直に立てて垂直のキ裂を模し、板の上端と下端はふさいでおき、片方の端から水または水と砂を流入し、他方の端から流出するようにした。実験の第1は水と砂とをある一定の割合で混合しながら流入して、キ裂内での砂の沈積状況を見たのであるが、このときは、装置の中の砂混合用ロートより砂を落下しながら水を一定レートで流し、時間の経過に対するキ裂内での砂の沈積状況を写真に撮った。また砂がそれ以上沈積せずに水平に流動しはじめるときの流速を測定して、これをもってそのときの条件下での平衡速度とした。次に第2の実験として、キ裂の中にあらかじめ砂を入れてピラミット状にその頭部がキ裂の頂部にまで達するようにしておき、これに水を流入して、砂を加えない水のみでの流動のときの平衡速度を測定した。

3.1.2 実験結果

実験第1 水と砂とを混合して流入した場合

砂には久の浜ケイ砂の10~20, 20~30, 30~40メッシュの3種類の砂を使った。砂の沈積の状況は各サイズの砂とも皆同じような傾向を示したので、10~20メッシュの砂についてその概略を述べることにする。

砂は235 g/l すなわち1.96 lb/galの割合で水に混入した。水は水道の水を用い、水の流入レートは27.2 cc/sec、換算すれば0.0103 bbl/minであった。キ裂の断面積に比して水の砂入レートが低いので砂はキ裂の中にはいるとすぐに沈積をはじめた。図4-1に流入開始30 sec後の状態を示す。水とともにキ裂にはいる砂は、先に沈積している砂の上にしだいに積み、しだいにその高さと奥行きを増加した。図4-2は流入開始1 min後の状態である。このようにしてしだいに砂の高さ

図4

が増し、砂の頂部とキ裂の上端との間隔が狭くなるにつれて、この間を通る水の速度が増加した。そしてついに流入開始2 min 30 sec後からは、流入した砂は沈積することなく、先に沈着している砂の上を水平に流動していくようになった。図4-3はそのときの状態を示す。このときからあとは、流入した砂は全部キ裂の奥の方に流動して砂のまだ高くなっていないところに沈積し、砂のタイ積はしだいに奥の方へ延びていった。図4-4は流入開始4 min後の状態を示す。砂が沈積せずに水平に流動するようになったあとは、タイ積した砂の頂部とキ裂の上端との間隔は変化しなくなったので、この部分の断面積と、水の流入レートから、この場合の平衡速度を計算することができた。すなわち、

$$V_e = \frac{Q}{A_e} = \frac{27.2}{0.8} = 33.8 \text{ cm/sec} = 1.27 \text{ ft/sec}$$

ここに V_e は平衡速度

Q は水の流入レート 27.2 cc/sec

A_e は砂の上のすいている部分の断面積
0.8 cm²

他のサイズの砂についても実験の推移はほとんど同じであった。それらの結果をまとめると次の表のとおりである。

表5 水と砂を混合して流入した場合の平衡速度

砂のサイズ	水の流入レート cc/sec	砂の混入率	平衡速度 cm/sec	同 左 ft/min
10~20	27.2	235 g/l (1.96 lb/gal)	38.8	76.2
20~30	25.3	118 (0.98)	36.1	70.8
30~40	27.8	125 (1.04)	32.9	64.5

この表で見ると、砂のサイズが小さくなるにつれて平衡速度も小さくなる。すなわち沈殿しにくい、逆にいえば、砂粒が大きいほど沈殿しやすい傾向が表われている。

実験第2 あらかじめキ裂内に砂のタイ積を作っておいて水を流入した場合

この実験は実験方法の項で述べたように、あらかじめキ裂模型の中に砂を充テンしておいて、砂を混合しないで水のみを流入して砂の流動状況からその平衡速度を求めた。これは、先の実験では砂の混合装置の操作の関係で、水の流入レートをあまり上げることができなかったため、砂の混入をやめることによって、水の流入レートを高くしようと考えたのである。すなわち、キ裂の中にあらかじめ水を満たしておき、キ裂の中央部の上端にあけた孔を通じてキ裂の中に砂を落下させ、砂がしだいにタイ積してピラミット状にその頂点がキ裂の上端にまで達するように砂を充テンした。充テンの途中で何回か装置に適当な振動を与えて砂のタイ積の安定がよくなるように注意した。図5-1はその砂の充テン状況を示す。今回も実験第1の場合と同じく、久の浜ケイ砂の10~20, 20~30, 30~40メッシュの3種類の砂を使ったが、この場合も、実験の推移は各サイズの砂全部はほぼ同様であったので、10~20メッシュの砂の実験についてその概略を述べ、他のサイズの砂については記録を表示するだけにとどめることにする。

上記のように10~20メッシュの砂を実験装置の中に充テンし、水の流入を開始した。水の流入レートは終始100 cc/secで実験第1の場合に比して約4倍のレートだった。水の流入をはじめるとただちに、砂のタイ積の頂部が削り取られ、そこに水

図5

の通路が作られた。水流入 30 sec 後の状況を図 5-2 に示す。砂のタイ積の上の水の流速が平衡速度より大きいので、タイ積の頂部の砂はしだいに流れ、タイ積の高さはしだいに削られた。そしてほぼ 1 min 後にはタイ積の上の水の流速が平衡速度に等しくなると、それ以後は砂は流れ去らなくなった。このときの状態を図 5-3 に示す。したがってこのときよりあとには、砂のタイ積の高さは変らなくなった。図 5-4 には水の流入開始 3 min 後の状態を示す。これらの写真に現われているように、水がキ裂の中に流入したときの勢いで砂のタイ積のすその方があおられて砂がまき上げられ、これが少量ずつタイ積の頂部に流れ込んだが、この砂は平衡速度に達した後は全部タイ積の頂部を越えてそのまま先の方に流れ去った。平衡速度に達した後に、水を流入させながら、砂のタイ積の上部のあいている部分の高さを測り、水の流動面積を求めて、このときの平衡速度を計算した。実験は 2 度行ない、その平均値を求めたところ 37.1 cm/sec であった。

20~30 メッシュ、30~40 メッシュの砂についても同様に実験を行なった。その結果は表 6 のとおりであった。

表6 砂を混入しない場合の水に対する平衡速度

砂のサイズ	水の流入レート	平衡速度 cm/sec	同 左 ft/min
10~20メッシュ	100cc/sec	37.1	73.0
20~30	100	36.1	71.1
30~40	100	35.1	69.1

砂の混入率と平衡速度との関係は、砂の混入率が大きいほど、すなわち砂が多量に混入されるほど沈殿しやすくなる。いいかえれば平衡速度が大きくなるものと考えられている。しかし、上記の実験で実験第1は 118 ないし 235 g/l (1 ないし 2 lb/gal) の砂を混入し、実験第2ではほとんど砂を混入していない (ここにほとんどという言葉を使ったのは、砂は全く混入しなかったが、水にあおられてまき上げられた若干の砂が砂のタイ積の上に流れ込んだので、これがわずかながら砂を混入したと同じ効果を及ぼしたかもしれないと思うからである)。そしてこの両者の実験結果を表 5 と表 6 によって比較してみると、10~20 メッシュの砂については後者のほうが小さくなり、20~30 メッシュの砂については全く同じで、30~40 メッシュの砂においては後者のほうが逆に大きくなっている。したがって、これらの結果からみれば、砂の混入率が平衡速度に及ぼす影響は、あまり顕著には認められないけれど、しかし混入

率の大きいほど沈殿しやすいことは一般的に考えられると思う。

3.2 中質原油を流体とした場合の平衡速度の一例

八橋油田の原油のような中質の原油を流体として用いた場合の平衡速度を実験的に求めようと考えたが、原油は不透明なために砂の運動の状況を観察することができず、したがって平衡速度を求めることが不可能である。そこで透明な軽油 (比重 0.806, 粘度 15°C にて 1.87 cp) を用いて、これに粘度を増すために機械油 (比重 0.919, 粘度 15°C にて 223 cp) と、比重をつけるために四塩化炭素 (比重 1.612, 粘度 15°C にて 1.05 cp) を適当に混合して比重 0.904, 粘度 15°C にて 3.00 cp の油を作り、これを中質原油に代用して平衡速度を測定した。

実験装置の略図を図 6 に示す。キ裂の模型は 3.1.1 にて説明したものと同じものを使用した。図 6 で観測室と記してあるのがそれである。水の場合には水道を用いて一定の流量の水を得たのであるが、油を流体に用いる場合には水道のようなものはないので、圧搾空気を用い、水銀レギュレーターにて一定の圧力に保ちつつ貯油槽内の油を空気によって加圧して一定の流量の油の流れを作った。

図6 実験装置略図

実験のやり方は 3.1.2 の場合と同じく、あらかじめ油を満たしたキ裂の中に砂をピラミット状に積み上げてキ裂の頂部にまで達しさせておき、水銀柱 90 mm の空気圧にて貯油槽内の油を押し出し 100 cc/sec のレートで油を流して砂のタイ積の上部の油の流れが砂を運ばなくなったときのこの部分における油の流速を測って平衡速度とした。

使用した砂は水の場合と同じく、久の浜ケイ砂の 10~20 メッシュ、20~30 メッシュおよび 30~40 メッシュの 3 種類で、それぞれ 3 回ずつ実験を行なってその平均値を求めたのであるが、その結果は、10~20 メッシュの砂については 83.3 cm/sec、20~30 メッシュの砂については 74.1 cm/sec、30~40 メッシュの砂については 66.7 cm/sec という平衡速度の値を得た。

油を流体とした場合でも砂の粒が大きくなるにつれて平衡速度が大きくなる。すなわち沈殿しやすくなる傾向を明瞭に示しており、水で実験した場合とよく合致する。

なお水を流体とした場合に比較して、油を流体とした場合は平衡速度の値がかなり大きくなってきており、粘度の高い流体を使う場合のほうが砂が沈殿しやすいという結果を示しているが、これは粘度の高い油のほうが乱流になりやすく、乱流をおこすためには大きな速度が必要であることを示しているものと考えられる。

3.3 キ裂内における砂の沈積について

今までに述べたところの実験結果は、垂直のキ裂における砂の流動について行なったものであるが、これらの結果を水平のキ裂にそのままあてはめて、水平のキ裂における砂の沈積状況を数的に求めてみた。一般に fracturing によって生ずるキ裂は油層の層理の関係から水平に生ずるのが多くて垂直なキ裂はまれであるとされているから、水平なキ裂の中の砂の流動ならびに沈積の状況をしらべることはたいせつなことである。

さて、キ裂の中の砂の沈積状態を考えるにあたって、次のことを仮定した。

- (1) キ裂の厚さはすべて一様である。
- (2) キ裂は水平に、しかも放射状にできている。
- (3) フラク液はキ裂の中で上下の地層に fluid loss をおこさない。

(4) フラク液はキ裂の中で radial flow を行ない、また流入レートは一定である。
一般にキ裂内における流入レートと流速の関係を次の式であらわされる。

$$Q = 2\pi r H \cdot V \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに Q は流入レート cc/sec
 r は坑心よりの距離 cm
 H はキ裂の厚さ cm
 V は流速 cm/sec

(6) 式より

$$V = \frac{Q}{2\pi H r} \quad \dots\dots\dots (7)$$

今平衡速度を V_e 、平衡速度に達した位置の坑心よりの距離を r_e とすれば

$$V_e = \frac{Q}{2\pi H r_e} \quad \dots\dots\dots (8)$$

今、坑心より任意の距離 r における流速を V とすると、 V が V_e よりも大きいときには、砂は沈殿することなく流動し去る。しかし流速は半径に反比例するので、坑心よりの距離が大きくなるにつれて流速度が小さくなり、ついに V_e の値と等しくなると、この点から砂の沈積が始まる。次に V が V_e よりも小さいときには、砂は沈積し、このときに沈積した砂の高さを h とすれば

$$V = \frac{Q}{2\pi r(H-h)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

砂の沈積がつづいて h の値が大きくなるにつれて、流速は大きくなり、ついに $V = V_e$ となるまで砂の沈積はつづけられる。このときの砂の沈積する高さ h と距離 r との関係は次のようになる。すなわち (9) 式において $V = V_e$ として

$$V_e = \frac{Q}{2\pi r(H-h)}$$

$$\text{ゆえに } h = H - \frac{Q}{2\pi V_e} \cdot \frac{1}{r} \quad (\text{ただし } r \geq r_e) \quad \dots\dots\dots (10)$$

この (10) 式によって坑心からの距離 r と砂の沈積する高さ h との関係を求めることができる。

中質原油を流体とした場合のキ裂内の砂の沈積の一例

3.2 に述べたところの中質原油の一例の実験によって得られた平衡速度の値を用いてキ裂内の r と h との関係を求めてみた。キ裂の厚さは $H=0.5$ cm, 1 cm, 3 cm の3種類とし、久の浜ケイ砂 10~20 メッシュ, 20~30 メッシュ, 30~40 メ

表7 中質原油を流体とした場合の砂の沈積の一例
坑心よりの距離と沈積の高さとの関係

$H=0.5$ cm		$H=1$ cm		$H=3$ cm	
r cm	h cm	r cm	h cm	r cm	h cm
10~20 メッシュの砂について ($V_e=83.3$ cm/sec)					
101	0	51	0	17	0
110	0.040	60	0.156	30	1.313
130	0.111	80	0.367	50	1.988
150	0.163	100	0.494	70	2.277
200	0.247	150	0.663	100	2.494
250	0.299	200	0.747	150	2.663
300	0.331	250	0.798	200	2.747
400	0.374	300	0.831	250	2.798
20~30 メッシュの砂について ($V_e=74.1$ cm/sec)					
155	0	57	0	19	0
130	0.060	70	0.182	30	1.091
150	0.118	100	0.427	50	1.855
200	0.214	150	0.608	70	2.182
250	0.271	200	0.714	100	2.427
300	0.309	250	0.771	150	2.618
350	0.336	300	0.809	200	2.714
400	0.357	400	0.857	250	2.771
30~40 メッシュの砂について ($V_e=66.7$ cm/sec)					
126	0	63	0	21	0
140	0.048	80	0.210	30	0.893
160	0.105	100	0.368	50	1.753
180	0.149	150	0.579	70	2.097
200	0.184	200	0.684	100	2.368
250	0.247	250	0.748	150	2.579
300	0.289	300	0.789	200	2.684
400	0.342	400	0.842	250	2.747

図7 r と h の関係 (中質原油の場合)

シュについてそれぞれ計算した結果を表7および図7に示す。キ裂内の流れのレート (すなわち fracturing の圧入レート) は、 $Q=10$ bbl/min (26.5 l/sec) とした。

この表によれば、たとえば 30~40 メッシュの砂の場合、厚さ 3 cm のキ裂ができたときには、坑壁付近は流速が平衡速度以上なので、砂は全く沈殿せずにキ裂の奥の方へと流れ去る。坑壁より奥にはいるにつれて流速が小さくなり、坑心から 21 cm の距離においてはじめて流速が平衡速度に等しくなって砂が沈積をはじめ。しかし少し沈積すればその部分の流速が平衡速度を越えるのでそれからあとは砂は全部キ裂の奥に流れ去

る。たとえば坑心より 50 cm の位置では砂が 1.753 cm の高さになればそれ以上は沈積しないで、あとの砂は全部キ裂の奥の方に流れ去るのである。このようにして坑心より 1.5 m の距離でもなお砂の沈積の高さは 2.6 cm 弱で、キ裂の上側との間に約 4 mm のすきまのできていることがわかる。

ゲルを流体に使った場合のキ裂内の砂の沈積

日本における fracturing は最近ほとんど全部フラク流体として原油ゲルを用いているので、最も多く使われている八橋原油ゲルを流体とした場合についてキ裂内の砂の沈積の状況を検討してみたいのであるが原油ゲルを用いて平衡速度を実験的に求めることは実験装置の関係上不可能だったのでアメリカにおいて水を基にしたゲルを流体とした場合の平衡速度を実験的に求めた記録²⁾を借用してその数値を用いてゲルを流体としたときの砂の沈積について計算を試みた。この場合の fracturing の圧入レートは 15 bbl/min (39.7 l/sec) とし、キ裂の厚さは $H=0.5$ cm, 1 cm および 3 cm とし、久の浜ケイ砂の 20~30 メッシュのものを用いた。その結果を表 8 および図 8 に示す。

表 8 ゲルを流体とした場合の砂の沈積の一例
坑心よりの距離と沈積の高さとの関係

$H=0.5$ cm		$H=1$ cm		$H=3$ cm	
r cm	h cm	r cm	h cm	r cm	h cm
45	0	22.6	0	7.5	0
60	0.124	30	0.247	15	1.494
80	0.218	50	0.548	30	2.247
100	0.274	80	0.718	50	2.549
150	0.349	100	0.774	100	2.774
200	0.387	150	0.849	150	2.849
250	0.410	200	0.887	200	2.887
300	0.425	300	0.925	300	2.925

$V_e=280$ cm/sec
砂は 20~30 メッシュ

図 8 r と h の関係 (ゲルを流体とした場合)

この表によってみると、たとえば厚さ 3 cm のキ裂ができた場合には、坑壁付近には流速が平衡速度以上なので、砂は沈殿せずにキ裂の奥の方に流れ去るが、坑壁より 7.5 cm 奥にはいったところで平衡速度に等しくなるのでこの点から砂の沈殿ははじまる。先に述べた中質原油を流体に用いたときに比して、圧入レートが大きくなっているにもかかわらず、砂の沈積が早くはじまるのは、ゲルの平衡速度が原油に比して大きいからで

ある。原油の場合と同じようにキ裂の奥の方へゆくにしたがって砂の沈積が高くなるが、ゲルの場合は砂の沈積が早く、坑心より 30 cm の位置ではすでに高さが 2 cm を越す。

なお、以上の検討はフラク液の fluid loss がないものとして考えたが、実際には fluid loss があって、このためキ裂内の流速がその分だけ小さくなるから、砂の沈積は実際にはもっとすみやかに起るものと考えられる。

3.4 キ裂内における砂の流動についての一般的考察

今まで述べたところの実験ならびに理論的検討を基にして、fracturing の際のキ裂の中の砂の流動ならびに沈積の状況を考察し、さらにこれを基にして、fracturing の効果に影響のある 2, 3 の事項についての検討を試みる。

キ裂内の砂の流動と沈積

現在われわれが行なっている fracturing の作業では fracturing によって作られたキ裂の入口、すなわち坑壁の付近では、フラク液の流速は常に平衡速度を超過しているものと考えられる。一般にキ裂は、前押し流体の圧入によって作られると考えられるから、砂がキ裂の入口に到着したときには、キ裂はかなり奥の方まで作られており、砂はフラク液の流れに乗って、そのままキ裂の中に流れ込む。キ裂の奥にはいるにつれて、流動面積が大きくなるから坑壁よりの距離に反比例して、流速は小さくなり、ついにある点において、流速が平衡速度に等しくなると、それから先は砂の沈積がはじまる。砂の沈積が起ると、流動面積が狭められるので、流速は再び平衡速度以上になり、それ以後は、その地点においては砂の沈積は起らず、あとから来た砂は全部キ裂の奥に流れ去る。このようにしてしだいに砂はキ裂の奥の方に向かって順次高くタイ積するが、キ裂の入口に近い地点、いいかえれば坑壁に近いキ裂の中には砂は最後まで沈積しない。

以上の状況を考えるときに、特に注意を引くことは、第 1 に fracturing の砂は先に入れたものがキ裂の奥の方にはいり、あとから入れたものがキ裂の入口に近く充テンされるものと考えられやすいが、実際にはその反対で fracturing の砂はあとから入れたものほど、キ裂の奥の方にはいること、第 2 に、キ裂の入口付近における流速が平衡速度よりも大きいと、最後までキ裂の入口付近には砂の沈積が起らぬことである。

後押し流体の圧入レートを低くすること

Fracturing によって油層に十分に大きなキ裂を作るためには、フラク流体をできるだけ高压高速で圧入することが望ましく、そのために近年 fracturing の圧入装置はますます大規模のものになってきて、圧入量も圧入レートも年をおって大きくなってきているが、キ裂の中の砂の流動と沈積の状況から考えると、後押しの流体すなわち fracturing の最後に近いときに圧入する流体は圧入レートをあまり大きくしないことが望ましい。なんとになれば、fracturing 作業中は圧入レートが大きいために、坑壁に近いキ裂の中では流速が平衡速度を越えているので、fracturing の砂は沈積することができず全部キ裂の奥の方に流れ込んでしまう。したがって、もし最後までそのように高い圧入レートで圧入すれば、結局砂は全部キ裂の奥の方にはいつてしまつて、最もたいせつな坑壁付近のキ裂の中には砂の充テンがなく、fracturing の圧力がなくなればキ裂は元に戻つてふさがってしまうのである。そこで、この現象を防ぐために

fracturing の最後に近くなったとき、すなわち後押し流体の圧入のときにしだいに圧入レートを下げて、キ裂の入口において流速が平衡速度以下になるようにする必要がある。かようにすれば、砂はキ裂の中全体にその入口の部分にまで完全に充テンして、fracturing の目的を達成することができるものと考えられる。

Fracturing の砂の最後に大径の砂を送入すること

Fracturing の砂の最後に径の大きい砂を送入して、キ裂の入口の付近の浸透率を大きくすることは fracturing の効果を増大する上にはほとんど影響がない。すなわち、浸透率 250 ダーシーの砂をキ裂の中に充テンし、最後にキ裂の入口付近に浸透率 800 ダーシーの砂を充テンした場合を考えても、産油能力の増加率は浸透率 250 ダーシーの砂のみの場合に比してほとんど大差がないことが計算上明らかにされている。その上、前項で述べたように、fracturing の圧入レートが終始変らないときには、あとから送入された砂は先に沈積した砂の上を流れ越してキ裂の奥の方にはいる傾向があるから、fracturing の砂の最後に大径の砂を送入しても、この砂はキ裂の奥の方にはいつてしまつて、キ裂の入口の浸透率を大きくすることには役立たない。

しかしながら、fracturing の最後に径の大きい砂を送入することは、次に述べるような考慮のもとに行なった場合には fracturing の効果を高める上に重要な役目を果たすることができると考えられる。すなわち、前項で述べたように、fracturing の圧入レートが近來著しく高められてきた結果、キ裂の入口付近では流速が平衡速度を越えているのでこのままではキ裂の入口付近に砂の沈積が起らない。そこでキ裂の入口付近に完全に砂を充テンするためには fracturing 作業の終りに近づくにつれて圧入レートを下げる必要があるが、このときに径の大きい砂を送入すれば、3.1 の実験によって明かなように、砂の径が大きくなるとその平衡速度が大きくなる。いいかえれば砂の沈殿が起りやすくなるので、キ裂の入口付近に砂の沈積が起りやすくなる。すなわち fracturing の最後に大径の砂を送入することと、圧入レートを低くすることによって、キ裂の入口にまで十分に砂を充テンすることができるようになると考えられるのである。

Over flush の効果

Fracturing の最後に圧入するところの砂を含まない後押し流体の圧入量が多すぎて、キ裂の中にこの砂を混入しない流体が圧入されることを Over flush というが、これが fracturing の効果にどのように影響するかを考えてみる。

一般的にいつて、砂の混入率が低いほど平衡速度は小さくなる。したがつて砂を混入しない圧入流体は砂を混入した場合にくらべて平衡速度が小さいので、砂を混入して圧入している間にキ裂の中に沈積した砂は、砂を混入しない流体の圧入がはじまると再び流れはじめてキ裂の奥の方にはいつてしまふ。したがつて fracturing によってキ裂の入口付近につくられた砂の

沈積が over flush によって再び洗い流されてしまひ、その部分のキ裂の中はからとなつてしまふことがある。この結果は fracturing によって作られたキ裂が fracturing のあとで、その入口付近が再び閉ソクしてしまふことになり、fracturing の効果を著しく減殺することになるのである。また、原油ゲルは原油よりも製作費が高くつくために、一般にフラク流体には原油ゲルを用い、後押し流体には原油そのままを使用することが多いが、原油を流体に用いる場合の平衡速度は原油ゲルを用いる場合に比してはるかに小さいので、原油ゲルを流体に用いて作られた砂の沈積を、砂を含まない原油の後押し流体で over flush すれば、沈積している砂がはなはだしく洗い流されてしまふ。したがつて、いずれの場合でも、over flush は避けるように注意しなければならないが、後押し流体に原油を用いたときには、特に over flush の害が大きいことに注意するを要し、なお、できれば後押し流体にも原油ゲルを用いることが望ましいのである。

Fracturing の効果がすくない場合の一つの考え方

Fracturing を行なつて、圧入量、圧入レート、圧力のかかり方および砂のはいり方など、すべての点について良好に行なわれたにもかかわらず、fracturing の効果があまりよくないというような例はしばしば経験するところであるが、この場合に今まで述べた各種の状況を考えてみる必要のあることがある。すなわち、圧入の最後まで坑壁付近のキ裂の中の流速が平衡速度よりも大きくて、キ裂の入口付近に砂が充テンしなかった場合でも、また over flush でキ裂の入口付近の砂を洗い流してしまつたときでも、地上にいて得られる記録には異状がないことが多く、圧入量、圧入レート、圧力のかかり方および砂のはいり方、いずれも満足すべき状態で fracturing としては成功したようにみえる。しかるに実際には、せっかく fracturing によって作られたキ裂も、その入口付近に砂が充テンされておらないために fracturing の圧入がなくなればキ裂は再び閉じてしまつて、fracturing の効果は全く減殺されてしまふのである。したがつて理由がよくわからないで fracturing の効果がないときには、以上述べたような現象が起っていることを考えてこれを避ける手段を講じて fracturing を試みてみる必要があるのである。この問題に関しては、今後たくさんの実験作業による経験を積み重ねつつ研究考察を進めてゆきたいものと考えている。

本文において述べたところの砂の流動および沈積に関する実験は、いずれも帝国石油（株）中央技術研究所において行なわれたものであり、これに関し同研究所第3研究室室長 斉藤光氏および同室研究員 南川 清、手塚真知子、笹川昭夫、小林一紀の諸氏の多大な御協力が得られたことに對して、ここに深甚なる感謝の意を表明するものである。

参 考 文 献

- 1) 八田，化学工学概論。
- 2) L.R. Kern, et al., *J. Petrol. Tech.*, XI, (7), 55 (1959).