ガスと水の垂直2相流の圧力損失の試算

石 塚 英 四 郎

(昭和44年1月30日受理)

Study of Pressure Gradients Occuring During Continuous Two Phase Flow

by

Eishiro ISHIZUKA

Abstract About this subject various studies have been made by many investigators. The author tried to find the energy loss of vertical flow dividing it into two parts which are "Slippage loss" and "friction loss". Many equations were made by using field data, and the solution is by calculating simultaneous equations. Although this paper is not excellent enough comparing with the previous one, there calculated factors show a few interesting peculiarities.

1. 概 要

この問題については、すでに多くの研究者によって解明が試みられているが、未解決の点も多く、それらの論文をそのまま水溶性ガスのリフトの計算に適用しても、満足な結果が得られなかった。従来われわれは、数多くの論文の中から、米国で最も広く信ぜられ、利用されている Poettman & Carpenter の論文¹⁾ (以下 P&C 論文と略称する) を1部修正²⁾ して使用してきた。しかしこの計算方法にも多くの矛盾がある。例えば Fanning の式の形の中で、滑り損失の要素と摩擦損失の要素を共存させることができるかどうか、また水溶性ガス採取ガスのリフトのような、大容量、低 G.L.R. の場合に適用できるかどうか等の問題がある。

それらの問題の解決策として、滑り損失と摩擦損失を分離して考えてみた。この方法も新しい方法ではなく、幾多の研究者によって試みられている。例えば J. Orkiszewski⁵⁾ は従来の種々の論文をまとめて論じ、滑り損失と摩擦損失を分離して考え、さらに流れの形態によって、エネルギー損失のとり方を変えている。そして今までのどの論文より適用範囲が広く、計算偏差も小さいと自賛している。

本報告の特徴は新潟ガス田における、水溶性ガス採取ガスのリフトの現場実験によって求めたデータを使用し、滑り損失と摩擦損失を表わす多くの方程式をたて、連立方程式の解として両者の関係を求めたことである。その他、過程において、他の2、3の方法で損失係数算出の計算を試みたので併せて述べる。本報告も従来の計算方法に比べ、特に勝れているわけでないが、計算結果は幾つかの興味ある事柄を表わしている。計算は I. B. M. の電子計算機の助けをかりた。

2. エネルギー損失の考え方

流体が管中を流れるときの圧力損失 ΔP_o を Fanning は周知のように、次式によって与えている。

$$\Delta P_o = f \frac{lpv^2}{d2g} \dots\dots\dots (1)$$

ここに F はエネルギー損失係数で、Fig 1 のようにレイノルズ数 Re と関係づけられている。また f は管壁の粗滑の割合 $\frac{\epsilon}{D}$ にも関係する。 ϵ は管壁の粗面山の高さである。 f と Re の関係式は多くの実験者によって、実用式が作られている⁶⁾。例えば、溶接管・引抜鋼管に対しては、次のランダーの式がよく合うとされている。

$$f = 0.016 + 1.13/Re^{0.44} \dots\dots\dots (2)$$

また滑らかな管に対して、板谷氏は次の式を与えてい

* 昭和43年5月29日石油技術協会第33回総会個人講演
** 帝国石油(株)技術研究所

Fig. 1 各摩擦損失係数の比較

る。

$$f = 0.314 / \{0.7 - 1.65 \log_{10} Re + (\log_{10} Re)^2\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ランダーの式、板谷の式を計算すると、Fig. 1の鎖線のようになる。

上述の計算式は单相流の場合であるが、2相流の場合は次のようになる。A. R. Hagedorn²⁾は垂直2相流のエネルギー損失をFig. 1のように与えている。Fanningの式の $\frac{\epsilon}{D} = 0.001$ の線と $Re = 4 \times 10^6$ あたりで交っているが、 Re がそれ以上になると、水平管と同じようなエネルギー損失の傾向を示すとしている。G. J. Davis氏もFig. 1に示すように、同じようなエネルギー損失の考え方をしている。P&C論文は粘性係数 μ を式の構成の中で考慮していないが、仮りに $\mu = 1 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{S/m}^2$ とすると、Fig. 1のような位置になる。前2者に比べると最も急勾配である。

3. 計 算 式

水平管を流れる流体の圧力損失の計算式のように、エネルギー損失係数を単一にレイノルズ数のみの関数にできれば好都合であるが、垂直2相流は、流れの形態が複雑で、単一の関数にするのは難しいようである。本報告はエネルギー損失の要素を、おもに流体と管壁の摩擦によるエネルギー損失と、それ以外のエネルギー損失（便宜上滑り損失と仮称する）に分けた。そして総体のエネルギー損失 W_t を次式のように考えた。

$$W_t = f' \frac{\Delta l \rho_m v_m^2}{2 dg} + f'' \frac{\Delta l dg (\rho_l - \rho_m)}{v_m^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

上式の第1項は、Fanningの式と同形で、摩擦損失に関連した項であり、 f' を摩擦損失係数とする。第2項は滑り損失に関連した項で、 f'' を滑り損失係数とする。また総体のエネルギー損失は、次式のように考えることができる。

$$W_t = (2.37 \times 10^4 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}) (S_{gl} w - S_s) - \{ \Delta l M - (P_1 - P_2) 10^4 \} \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式の第1項は消費したガスの持っていた総仕事量である（等温変化）。第2項は Δl の距離を、流体が移動するために要した、損失のない場合の正味の仕事量である。

る。(4)、(5)式において

$$\frac{\Delta l \rho_m v_m^2}{2 dg} = a, \quad \frac{\Delta l dg (\rho_l - \rho_m)}{v_m^2} = b, \quad -W_t = c \quad \text{と}$$

すると次の形で表わされる。

$$af' + bf'' + c = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式において、 f' 、 f'' を何等かの手段によって求めることができると、2点間の圧力差が計算でき、圧力勾配を求めることができる。

4. 略符号と計算仮定

Fig. 2のような、垂直管内のガスと水の均一な流れにおいて、任意の2点を考え、圧力・容積・高さをそれぞれ P_1, V_1, h_1 および P_2, V_2, h_2 とする。その他の略符号の説明、仮定、計算式および単位をTable 1に示

Fig. 2 流れの概念

Table 1 略符号の説明, 仮定, 計算式, 単位

略 号	内 容 説 明	仮定ならびに計算式	単 位
W_t	h_1 から h_2 の深度差で失なわれたエネルギー損失の総和		kg/m ²
f	単相流の場合の摩擦損失係数		
f'	2 相流の場合の摩擦損失係数, 添字は計算区分である		
f''	2 相流の場合の滑り損失係数, 添字は計算区分である		
Δl	2 点間の高さの差	$=h_1-h_2$	m
ρ_m	2 点間の平均密度		kg/m ³
ρ_l	波上げ液体の密度	$=1,008$	kg/m ³
$S_{g/w}$	標準状態のときのガスと水の比		
$P_{g/w}$	圧力下におけるガスと水の比		
S_l	水の比重	$=1.008$	
S_g	ガスの比重	$=0.65$	
M	単位体積の水に付帯したガスと水の質量	$=1000 G_l+1.22 G_g \cdot S_{g/w}$	kg
V_m	圧力下で単位体積の水に付帯したガスと水の体積	$=1+1.1 Z(S_{g/w}-S_g)/\frac{P_1-P_2}{2}$	m ³
v_m	2 点間の平均速度		m/s
A	液体の流れる部分の管の断面積		cm ²
d	管の見掛けの直径, m は流体平均深さ	$=4m$	m
μ	粘性係数	$=(0.0115+0.719/V_m)10^3$	kg・S/m ²
Z	容積係数	$=0.998-0.00207(P_1-P_2)/2$	
S_g	ガスの溶解度		
g	重力の加速度	$=9.8$	m/s ²
F_r	フルード数	dg/v_m^2	
T_{avg}	流動平均温度	$=308$	°k
T_a	標準温度	$=288$	°k
P_a	標準圧力	$=1.033$	kg/cm ²
Re	レイノルズ数	$d\rho_m v_m/\mu$	

す。Table 1 中の Z , μ , d については下記のように考えた。

容積係数 Z について

$S_g=0.65$, $T_{avg}=308^\circ\text{k}$ のときの Z と $\frac{P_1-P_2}{2}$ の関係を求めると, 次式のようになる。

$$Z=0.998-0.00207(P_1-P_2)/2$$

上式はわれわれが通常の計算において必要とする 40 kg/cm²a までは, 小数点以下 3 桁まで合致する。(P&C 論文の付表との比較)

粘性係数 μ について

Hagedorn (1965)²⁾ によれば, 2 つの成分が混合されている場合, その混合体の粘性係数 μ_m は次式で与えられる。

$$\mu_m=X\mu_1+(1-X)\mu_2 \dots\dots\dots (a)$$

μ_1 , μ_2 は 2 つの成分のそれぞれの粘性係数である。上式は理想的の混合状態のときの粘性係数であり, 理想的の混合状態でないときの粘性係数を Arrhenius²⁾ 氏は次式で与えている。

$$\mu_m=\mu_1^X\mu_2^{1-X} \dots\dots\dots (b)$$

(b) 式の X は液体のホールドアップの要素である。
(a), (b) 式の関係を図表にすると, Fig 3 のようになる。本報告はホールド・アップの計算をしていないため

Fig. 3 混合体の粘度

Fig 3 混合体の粘度

に、簡単に式に(a)によって計算をした。

(a)式において、液体の粘性係数 μ_1 を 0.73 c.p. ガスの粘性係数 μ_2 を、0.0115 c.p. とすると、次式のようになる。

$$\mu_m = (0.015 + 0.719/V_m)10^{-3}$$

上式において、 μ_1, μ_2 は 34°C, 1 atm の水と天然ガスの粘度である。ガスの粘度は圧力の影響を受けるが、水との混合体の粘度を考える場合無視してもさしつかえないようであり、本報告は上式を使用して計算した。

見掛けの直径 d について

見掛けの直径は水力径によった。同様な考え方は P. B. Baxedell³⁾ 1961; Oriouille D. Gaither⁴⁾ 1963; Orkiszewski⁵⁾ 1967 等も採用しているが、いずれもケーシングの中にチュービングを1本入れた場合の、アニラスフロウの場合である。われわれが新潟で実験したような、ケーシングの中に3本のチュービングを入れたような場合に適合するかどうか疑問であるが、ほかに頼れる方法がなかったので、水力径によって見掛けの直径を求めた。

チュービング 1 本の場合の水力径は次式のようになる。

$$\text{水力径} = 4 \frac{\frac{\pi}{4}(D_c^2 - D_t^2)}{\pi(D_c + D_t)} = D_c - D_t$$

ここに D_c はケーシングの内径、 D_t はチュービングの外径である。上式に準拠して複数本のチュービングの場合は、次式が成立すると仮定して、見掛けの直径を算出した。

$$\text{見掛けの直径 } d = \frac{D_c^2 - D_{t1}^2 - D_{t2}^2 - D_{t3}^2 \dots}{D_c + D_{t1} + D_{t2} + D_{t3} \dots}$$

5. 実験井の状況

エネルギー損失係数を求めるためのデータは、新潟ガス田における現場実験データを使用した。地上実験装置の配置、坑内図および、実験井の諸元は既に本誌上⁷⁾に発表してあるので省略する。

6. エネルギー損失係数を求める計算

計算 1. f_1' を与えて f_1'' を求める

(6)式において、 f_1' を水平管の摩擦損失と同等に考えて与え、滑り損失係数 f_2'' を未知数として解いた。この計算では f_1' に、前述の板谷の式を用いた。

求めた f_1'' をフルード数 Fr に対してプロットすると Fig. 4 のようになる。SR 25 のデータはばらつきが多いので除いた。

Fig. 5 に、SR 25 の計算値と、リフト管下部の計算値を示す。SR 25 の場合は、ガス注入深度が浅い場合 (96

Fig. 4 滑り損失係数

Fig. 4 滑り損失係数

Fig. 5 滑り損失係数

m と 100m) ・深い場合 (150m 以下) に異なった傾向を示している。また、リフト管下部のように、低い G. L.R., 小さいバップルの場合、さらに異なった傾向を示している。これは流れの形態によって、エネルギー損失のとり方を変える必要があることを示唆している。

測定誤差について

上述の計算において、重要な測定値は、各深度にお

Fig. 6 滑り係数の誤差計算

ける圧力、ガスおよび水の流量であり、その他はそれらの測定値から誘導するか、または適当に仮定した値である。圧力の測定値は(5)式の第2項に関連して、計算値を大きく左右するようである。Fig. 6に SR 26 の滑り損失係数 f_1' と、フルード数 Fr の全計算関係を示す。Fig. 6 の中央に、計算値の平均カーブを示すが、その平均カ

ープに近い計算値のうち、代表点10を選定し（黒い大きな点で示す）、その点を計算したときの、2点の圧力 P_1 、 P_2 のうち、 P_2 を 0.1 kg/cm^2 、および 0.2 kg/cm^2 増減したときの影響について、計算した。前者の平均カーブを実線で、後者を鎖線で示す。

Fig. 6によると、ほとんどの計算値が $P_2 \pm 0.2 \text{ kg/cm}^2$

Table 2 誤差計算の代表測点データ (SR 26)

測定番号	ガス注入 深度 m	測定深度 m	h_1-h_2	圧 力 P_1 kg/cm ² a	圧 力 P_2 kg/cm ² a	生 産 量 KL/日	$S_{g/w}$	$S_{g/w}-S_s$
549	200	0—12	12	2.16	1.55	3,390	3.10	3.06
399	100	12—23	11	2.27	1.71	2,700	3.29	3.22
586	250	35—41	6	3.49	3.08	3,000	2.76	2.66
458	150	23—35	12	3.20	2.41	2,410	2.36	2.27
660	300	53—65	12	5.44	4.51	2,760	2.50	2.35
465	150	0—12	12	1.82	1.19	1,480	1.90	1.86
533	200	65—95	30	7.94	2.61	2,180	1.80	1.60
435	100	23—35	12	3.24	2.42	1,440	1.91	1.83
640	250	155—185	30	16.8	13.9	1,740	1.72	1.27
701	300	95—125	30	10.91	8.20	1,510	1.91	1.63

Table 3 滑り損失係数 f_1'' の誤差計算

測定番号	測定値よりの f_1''	P_2 測定値を変えた場合の f_1''			
		$P_2-0.2$ kg/cm ²	$P_2-0.1$ kg/cm ²	$P_2+0.1$ kg/cm ²	$P_2+0.2$ kg/cm ²
549	9.49	1.42×10	1.18×10	7.05	4.65
399	7.05	1.1×10^2	9.0×10	5.1	3.11
586	3.75	9.5	6.65	8.7	負 数
458	2.06	3.93	3.00	1.12	1.87×10^{-1}
660	1.69	3.95	2.82	5.64×10^{-1}	負 数
465	9.73×10^{-1}	1.85	1.41	5.35×10^{-1}	9.6
533	6.81×10^{-1}	1.32	9.9×10^{-1}	3.36×10^{-1}	9.8
435	4.75×10^{-1}	1.08	7.68×10^{-1}	1.40×10^{-1}	負 数
640	2.93×10^{-1}	9.40×10^{-1}	6.67×10^{-1}	負 数	負 数
701	2.77×10^{-1}	6.5×10^{-1}	4.7×10^{-1}	9.3×10^{-2}	

Table 4 各 計 算 の 負 の 割 合

流 れ の 形 態	試験坑井	P・C論文			板 谷 の 式			板谷の式×2.8			連立方程式による解				
		総数	-f	比率	総数	-f ₁ '	比率	総数	-f ₃ ''	比率	総数	-f ₂ '	-f ₂ ''	-f ₂ ', -f ₂ ''	比率
4時チュービングフロウ	NR114	29	0	%	29	2	%	29	10	%	29	15	11	1	%
6時 "	"	35	4		38	7		38	21		38	14	16	0	
8時アニラス フロウ	SR 25	121	30		140	31		140	54		140	69	61	5	
"	SR 26	153	2		189	2		189	7		189	65	52	0	
"	UR 16	243	48		310	74		310	107		310	152	113	0	
10時アニラス フロウ	NR114	76	4		100	7		100	20		100	55	38	0	
小 計		657	88	13.4	806	117	14.5	806	219	27.2	806	365	291	68	1.7
8 時 リ フ ト 下 管	SR 25				70	2		70	48		70	21	35	2	
	SR 26														
	UR 16														
10時 "	NR114				32	21		32	30		32	20	17	9	
小 計					102	23	22.6	102	78	76.5	102	41	52	11	8.7

の範囲内に入ること示している。この範囲に入らない、最も偏差の大きい計算点 No 601 および No 466 において、 P_1 を変えないで、 $P_2=0.1 \text{ kg/cm}^2$ とした場合について計算すると、平均カーブに近い位置に移動する (○印で示す)。上述の代表点 10 の測定データを Table 3 に示す。また Table 4 に P_2 の値を変えた場合の計算値を示す。

新潟ガス田の実験における圧力の測定は、1400 P.S.I. の輸入アメラダ坑底圧測定機によった。この測定機の公称測定誤差は 0.1% である。1400 P.S.I. の 0.1% は約 0.1 kg/cm^2 である。また圧力の記録には変動があり、どの辺を測定圧力にするかにも問題がある。また圧力の測定は同時記録でなく、測定機を上下するに要する時間的のずれがある。それらのことを考えると、圧力測定の偏差 0.2 kg/cm^2 位は、やむを得ない値のようにも考えられる。

上述のように、圧力の僅かの測定誤差によって、滑り損失係数が大きく変わり、負になる機会も多くなる。各方程式の計算における、負の計算数をまとめると Table 4 のようになる。

計算 2. 連立方程式による解

(6)式において、 f' と f'' 以外は、測定値と仮定値による既知数である。 f' と f'' を未知数と考え、数多くの方程式をたて、その方程式をフルード数の大きの順に並べ、相隣りの 2 つの方程式をそれぞれ解いて、 f_2' と f_2''

の値を求めた。求めた f_2' と f_2'' をフルード数に対してプロットすると Fig.7 のようになる。Fig.7 において、◎印は計算数が 3 以上の平均であり、○印は最もずれの大きい 1 つを除いた場合の平均である。

摩擦損失係数 f_2' について。

Fig.7 によると、摩擦損失係数はフルード数に対してほぼ一定で、約 0.04 である。板谷の式では摩擦損失係数をレイノルズ数に対して求めているが、フルード数に対する関係に直すと、Fig.7 の鎖線のようになる。 f_2' の値は板谷の式のそれの約 2.8 倍に相当する。

滑り損失係数について

Fig.7 に計算 1 で求めた、滑り損失係数 f_1'' を鎖線で示す。連立方程式の解による f_2'' とフルード数が 0.25 ~ 0.8 の範囲においてほぼ一致している。しかし、それよりフルード数が大きいと、小さいと、非常に異なった傾向を示している。

この解においては、損失係数の負になる機会が非常に多く、両方とも正になる解は、全計算数の約 18% に過ぎなかった。

計算 3. 摩擦損失係数を板谷の式の 2.8 倍にした場合

計算 2 の連立方程式の解によると、摩擦損失係数は板谷の式の約 2.8 倍である。(6)式において、摩擦損失係数を、板谷の式の 2.8 倍として与え、 f_3'' を求め、フルード数に対してプロットすると Fig.8 の実線のようになる。鎖線で、板谷の式の場合を示すが、両者は割合に近似した傾向を示している。

計算 4. 回帰分析による解

I.B.M. 社の回帰分析 BMD 02 R によって解いてみた。解は摩擦損失係数 f_4' を、レイノルズ数の関数、滑

Fig.7 連立方程式の解による F_r と f_2' , f_2'' との関係

Fig.8 滑り損失係数の比較

り損失係数 f_4'' をフルード数の関数として求めた。結果は、 f_4'' は計算 2 の解と同じような傾向を示したが、 f_4' は全く異なった傾向を示した。これは、このような計算方法が未だ I. B. M. で確立されてなく、計算方法が不適当であることに原因があるようである。

7. エネルギー損失の考え方

前節の計算のうち、連立方程式による解が最も現実性があるようなので、その損失係数を下記のように若干変形して、現場に適用するための計算を試みた。

a. 摩擦損失係数 f'

摩擦損失係数は、Fig.7 によると、0.04 一定とみなしてもさしつかえないと考え、0.04 とした。Nikuradse⁶⁾ の実験によると、粗面管の場合の摩擦損失係数は、レイノルズ数に無関係にほぼ一定である。セメント管の粗面山の高さ $\epsilon=0.002\sim0.004$ 、 $D=0.2$ とすると、 $\frac{\epsilon}{D}=0.01\sim0.02$ となり、 $f=0.038\sim0.049$ となる。すなわち上述の摩擦損失係数 0.04 は興味深い値である。摩擦損失係数 0.04 の場合、混合流体の速度 v_m と、(4)式の第 1 項 (摩擦によるエネルギー損失の項) との関係の求めると、Fig.9 の鎖線のようなになる。この計算は $\rho_m=400$ の場合である。

Fig. 9 速度とエネルギー損失の関係

b. 滑り損失係数 f''

Fig.7 の滑り損失係数 f_2'' を使用し、混合流体の速度 v_m と、(4)式の第 2 項 (滑りによるエネルギー損失の項) との関係の求めると、Fig.9 の太線と細線のようなになる。Fig.7 の f_2'' のカーブにおいて、もしフルード数 Fr の 0.3 から 0.8 の間が、計算 1 の f_1' の傾向を持つとすると、Fig.9 の太線のようなカーブになる。後者

の傾向が矛盾が少ないと思われるので、適用計算に使用することにした。Fig.9 の点線は、摩擦によるエネルギー損失 W_f と滑りによるエネルギー損失 W_s の和である。混合流体の速度が 0.9 m/s 以下だと滑り損失が多く、4 m/s 以上だと摩擦損失が多くなる。混合体の速度は 0.9~4.0 m/s が最も損失がないことになる。

8. 適用計算

- a. $4\frac{1}{2}C-2\frac{3}{8}T$ ならびに $4\frac{1}{2}C-1G.P$ のアニラスフロウの計算

前節のエネルギー損失の値を使用し、500, 1,000, 2,000, 4,000, kL/日 の産出水量に対し、2.4, 4.0, 6.0, 10.0, 25.0 の G.L.R. を組み合わせて計算した。坑口圧力は $1.2\text{ kg/cm}^2\text{a}$ 、圧力差 P_1-P_2 は、圧力が低い範囲は小さく、高くなるに従って大きいくし、それに対する距離を求め、流動圧力勾配を決定した。Solubility は新潟ガス田の平均データのカーブを、何本かの直線で代表させて使用した。計算結果より、動水位と所要 G.L.R. の関係を、ガス注入深度に対しプロットした図表を作成し、所要の条件下のリフトの状態を類推した。Fig.10 にそれらの図表の 1 例を示す。

- b. $8\frac{5}{8}$ セメントライニング管と $2\frac{3}{8}T$ のアニラスフロウの計算。

流量以外は、上述 a と同条件で計算した。流量は 500, 1,000, 2,000, 4,000, および 8,000 kL/日 とした。

Fig. 10 動水位と G.L.R. の関係

— Fig. 10 動水位と G.L.R. の関係

9. 比較計算

a. 作田ガスリフトとの比較

千葉県の作田ガス田のガスリフトのデータの中で、 $4\frac{1}{2}C$ と $2\frac{3}{8}T$ のアニラスフロウ、ガス注入深度 80

Fig. 11 各計算と作田のデータの比較

Fig. 12 産出水量とG.L.R.の関係

～100m, 産出水量 290～300 kL/日 の範囲内にあるデータを拾って、動水位と G.L.R. の関係をプロットすると Fig 11 の ○印のようになる。それに対して、下記のような種々の式よりの計算結果を比較した。

- (1) P&C 論文を若干修正⁷⁾して使用したもの。これはアニラスフローである。
- (2) U.S.I Got 社のマニュアルの図表より算出したもの。これは産出水量 320 kL/・, 内径 50.7φ, 62.0φ および 74.2φ のチュービングフローの場合である。
- (3) 本計算の式によるもの。これはアニラスフローである。

Fig 11 によると、本計算結果は、作田のガスリフトに比べ、傾向としては合うが、G.L.R. が約半分である。

d. P&C 論文の 1 部修正⁷⁾したものと、本計算との比較

下記のような条件の場合、P&C 論文の一部修正計算⁷⁾と、本計算との比較を Fig 12 に示す。条件として、(1) 坑底圧力は産出水量 1,000 kL/・ について 2 kg/cm² の割合で直線的に降下する。(2) ガス注入深度は 300 m。(3) リフト管下部の圧力勾配は 0.1 kg/cm²/m。(4) 静止液面は 80 m とした。

Fig 12 によると、本計算は P&C 論文に比べ、産出水量の低い範囲に効率のよいところがある。

10. 結 言

本計算は式の構成、現場測定データの不備等により、計算結果は現場のデータと必ずしも一致しないが、流れの形態として、つぎのような、常識的の結果を示している。

- (1) 最も損失の小さい垂直管内の速度は、条件によって変るが $P_m=400$ の場合 1～4 m/s 位である。これはレイノルズ数が $10^6 \sim 10^7$ 位の範囲であり、滑り損失の影響が漸減し、摩擦損失が増加し初める状態に相当する (Fig 1, Fig 9 参照)。これは A.R. Hagedorn 等の計算にも表わされている。
- (2) 連立方程式によって、摩擦損失係数を求めると、水平管の場合と近似した値 0.04 になった。これは興味深いことである (Fig 1, Fig 2 参照)
- (3) 滑り損失係数の誤差計算によると (Fig 6 参照), 測定圧力の僅かな誤差が大きく影響し、果してどの程度、正確な計算ができるものか問題である。

る。

- (4) 本計算は狭い範囲の現場測定データより、他の条件の流れを類推しているが、もっと広範囲のデータを求めることができれば、もっと現場に適した計算ができると考える。

謝辞 本計算の基礎的な問題について、東京大学故淵田隆門教授、帝石技研加藤元彦所長より、御教示戴いた。

参 考 文 献

- 1) Poettman and Carpenter, 1952, Drilling and Production Practice, pp.257~317.
- 2) R.Hagedorn, 1965, Jour. Pet. Tech., April, pp.475~484
- 3) P.B. Baxendell, 1961, Jour. Pet. Tech., October, pp.1025.
- 4) Orville D.Gaither, 1963, Jour. Pet. Tech., March, pp.312.
- 5) J.Orkiszewski, 1967, Jour. Pet. Tech., June, pp.832.
- 6) 日本機械学会, 1968, 機械工学便覧, pp.8—14~15.
- 7) 石塚英四郎, 1963, 石技誌, 28巻, 6月。