

低ガス圧電力ケーブルのガス圧伝播と電気特性

Electrical Characteristics at Low Pressure Gas-Filled Cables with Gas Pressure Propagation

今井 利宣* 中西 一清*
Toshinobu Imai Issei Nakanishi

内 容 梗 概

低ガス圧電力ケーブルの一端に一定圧力の窒素ガスを加圧してガスの充填を行う場合および一端を開放してガスを放出させた場合にガス圧の過渡変化を示すのに便利な“圧力伝達時定数”を定義しこれを用いて圧力の伝達を表わすことを試みた。さらに圧力伝達に関する相似則を求めこれが成立することを実験によりたしかめ、同一構造の異なつた長さのケーブル数種について実験すれば任意条長のケーブルの圧力伝達特性が知れることを検討した。

またガスを充填、放出した場合における誘電正接の変化を測定し、ケーブルの半径方向の圧力伝達特性について考察を行った。

〔I〕 緒 言

低ガス圧電力ケーブルの鉛被に事故が起り窒素ガスが漏洩すると漏洩点付近のガス圧が低下するばかりでなく時間の経過とともに伝播によつてケーブル各部のガス圧は低下する。ガス圧の低下は給ガス点の警報発信装置によつて知らされるのであるがケーブルのガス通路にはガス流動抵抗が存在するので故障点の影響が現われてくるまでには時間的な遅れがある。この時間の遅れがケーブルの長さ、漏洩孔の大小などによつてどのように変化するかを知るのは故障点発見の方法を決定する基礎としても、ケーブル保守の面からも重要な問題である⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。この関係を明らかにするには数多くの実験が行わなければならないが、その一環として窒素ガス充填および放出時における圧力の過渡変化を検討した。

なおケーブル軸方向のガス圧力変化に伴なつて半径方向のガス圧力分布状態が変化しケーブルの電気特性（主として誘電正接）に影響を及ぼすが⁽⁴⁾、これとケーブル条長との関係について吟味した結果を述べる。

〔II〕 ガス伝達の基礎方程式の誘導

(1) ガス伝達の微分方程式

長いガス管にガスが流動しているとき、ガス管の任意の点に微小長 Δx の部分を限つて考えると、 Δt 時間に Δx におけるガス量の増加は

$$-\frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \Delta x \cdot \Delta t \dots\dots\dots(1)$$

Q : 単位時間に流れるガスの量 (g/sec)

また電気容量 C に対応するような定数 ϵ を定めれば、 Δx 両端の圧力差 Δp として、 Δt におけるガス量の増加は

$$\epsilon \cdot \Delta p \cdot \Delta x \dots\dots\dots(2)$$

である。(1) および (2) 式が等しいことより次の微分

* 日立電線株式会社電線工場

方程式が成立する。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -\epsilon \frac{\partial p}{\partial t} \dots\dots\dots(3)$$

また流れが層流をなす場合には Hagen-Poiseuille の式が成立する。

$$Q_v = \frac{\pi r^4}{8 \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots(4)$$

Q_v : 体積流量 (cm³/s)

r : 管の半径 (cm)

μ : 粘性抵抗 (g/cm²/s)

今 ρ をガスの密度 (g/cm³) とすれば、質量流量 Q は

$$Q = \rho Q_v$$

また等温変化においては

$$\rho = \sigma p$$

σ : ガス比容量

であるから (4) 式は

$$Q = \sigma p \frac{\pi r^4}{8 \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\pi r^4 \sigma}{16 \mu} \cdot \frac{\partial p^2}{\partial x}$$

ここで

$$\frac{\partial p^2}{\partial x} = -WQ \dots\dots\dots(5)$$

とおけば

$$W = -\frac{16 \mu}{\pi r^4 \sigma} = \text{const.}$$

この W はその値が大きいほど圧力降下が大であるので流動抵抗と呼ぶ。(3) および (5) 式より

$$\left(\frac{m_0 \pi^2}{4 l^2 p_a}\right) \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (P + p_a) \frac{\partial p}{\partial x} \right\} \dots\dots(6)$$

ここで

$$m_0 = \frac{4 l^2 W \epsilon}{2 \pi^2 p_a} \dots\dots\dots(7)$$

p_a : 大気圧力 P : ゲージ圧力

とおき、 m_0 を流通時定数と名づける。

(5) 式より

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{W}{2(P+p_a)} Q$$

P は $0 \sim 1 \text{ kg/cm}^2$ の間で変化し、 $p_a \doteq 1 \text{ kg/cm}^2$ であるから

$$\tau = \frac{W}{2(P+p_a)} \dots\dots\dots (8)$$

とすれば τ の上限は 0.5 W 、下限は 0.25 W となる。したがって 30% 程度の誤差を無視すると、 $\tau = 0.38 \text{ W}$ として、 τ を一定にして取り扱える。ゆえに

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\tau Q \dots\dots\dots (9)$$

次にケーブルの条長を l としたとき

$$m = \left(\frac{\pi^2}{4l^2} \cdot \frac{1}{\tau\varepsilon} \right)^{-1} \dots\dots\dots (10)$$

とおき、伝達時定数と名づけると (7), (8), (10) の各式より

$$m_0 = \left(1 + \frac{P}{p_a} \right) m \dots\dots\dots (11)$$

となる。したがって m が圧力によつて変化しても m_0 は (11) 式によつて一定となる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

今線型化された基礎方程式を書く

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x} &= -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial t} \\ \frac{\partial P}{\partial x} &= -\tau Q \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

(12) 式を基礎としてガス圧伝達の特徴を解析する。

この式で注目されることは Q を電流、 P を電圧、 τ を抵抗に置換すると RC 分布定数回路の微分方程式に一致していることである。すなわち (13) 式のようなになる⁽⁷⁾。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial i}{\partial x} &= -C \frac{\partial v}{\partial t} \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= -Ri \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

(12) 式の一般解を求めると次のようになる。

$$P(x, t) = \sum_a e^{-\frac{a^2}{\tau\varepsilon} t} (A_a \sin ax + B_a \cos ax) + K_0 + K_1 x \dots\dots\dots (14)$$

$$Q(x, t) = \sum_a \frac{a}{\tau} e^{-\frac{a^2}{\tau\varepsilon} t} (A_a \sin ax - B_a \cos ax) - \frac{K_1}{\tau} \dots\dots\dots (15)$$

ここで A_a, B_a, a, K_0 および K_1 は境界条件および初期条件によつて定まる定数である。これをガス充填、放出の場合について解くと次のようになる。

(2) 微分方程式の解

(a) 充填の場合 (ケーブルの一端を密閉し他端にガス圧 P_0 を加える)

この場合の初期条件および境界条件は次のとおりである。

- (i) $x=0$ において、すべての t に対して $P_{(0, t)} = P_0$
- (ii) $x=l$ において、すべての t に対して $Q_{(l, t)} = 0$
- (iii) $t=0$ において、 $x=0$ 以外のすべての x に対して $P_{(x, 0)} = 0, Q_{(x, 0)} = 0$ ($x \neq 0$)
- (iv) $t=\infty$ において、すべての x に対して $P_{(x, \infty)} = P_0, Q_{(x, \infty)} = 0$

以上の条件で解くと

$$P_{(x, t)} = P_0 - \frac{4P_0}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} e^{-\left(\frac{2n+1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2}{l^2} \frac{1}{\tau\varepsilon} t} \times \sin\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{x}{l}\right) \dots\dots\dots (16)$$

$$Q_{(x, t)} = \frac{2P_0}{\tau l} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\left(\frac{2n+1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2}{l^2} \frac{1}{\tau\varepsilon} t} \times \cos\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{x}{l}\right) \dots\dots\dots (17)$$

(16) 式をそのまま用いるのは不便であるから第2項以下を省略する。このときの誤差は t の小さな範囲で大きく 30% 程度となるであろう。

$$P_{(x, t)} = P_0 \left(1 - \frac{4}{\pi} e^{-\frac{\pi^2}{4l^2} \frac{1}{\tau\varepsilon} t} \right) \sin \frac{\pi}{2} \frac{x}{l} \dots\dots\dots (18)$$

$t = m$ のとき

$$P = P_0 \left(1 - \frac{4}{\pi} e^{-1} \right) \doteq 0.53 P_0$$

すなわち m は末端のガス圧力が P_0 の約 50% に上昇する時間を表わす。実験結果について t, P および P_0 を知れば

$$m = \frac{t}{\log \frac{4}{\pi} \frac{P_0}{P_0 - P}} \dots\dots\dots (19)$$

$$m_0 = \left(1 + \frac{P}{p_a} \right) m \dots\dots\dots (20)$$

この両式で m および m_0 の値が決定され、この m, m_0 でケーブルのガス圧力伝達状態を表わす。

(b) 放出の場合 (ケーブルのガス圧が定常状態になつたとき、一端を密閉し他端を解放する)。

この場合の初期条件および境界条件は次のとおりである。

- (i) $x=0$ において、すべての t に対して $P_{(0, t)} = 0$
- (ii) $x=l$ において、すべての t に対して $Q_{(l, t)} = 0$
- (iii) $t=0$ において、すべての x に対して $P_{(x, 0)} = P_0$
- (iv) $t=\infty$ において、すべての x に対して

$$P_{(x, \infty)}=0, Q_{(x, \infty)}=0$$

以上の条件で解くと

$$P_{(x, t)} = \frac{4}{\pi} P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} e^{-\left(\frac{2n+1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2}{l^2} \frac{1}{\tau \varepsilon} t} \times \sin\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{x}{l}\right) \dots (21)$$

$$Q_{(x, t)} = -\frac{2 P_0}{\pi l} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\left(\frac{2n+1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2}{l^2} \frac{1}{\tau \varepsilon} t} \times \cos\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{x}{l}\right) \dots (22)$$

(21) 式の第2項以下を省略すると

$$P_{(x, t)} = \frac{4}{\pi} P_0 e^{-\frac{\pi^2}{4l^2} \frac{1}{\tau \varepsilon} t} \sin \frac{\pi}{2} \frac{x}{l} \dots (23)$$

$t=m$ のとき

$$P = \frac{4}{\pi} P_0 e^{-1} \approx 0.47 P_0$$

すなわち m は末端のガス圧力が P_0 の約50%に下降する時間を表わす。実験結果について t, P および P_0 を知れば

$$m = \frac{t}{\log \frac{4}{\pi} \frac{P_0}{P}} \dots (24)$$

$$m_0 = \left(1 + \frac{P_0 - P}{p_a}\right) m \dots (25)$$

この両式で m および m_0 の値が決定される。

(3) 相似則

(6) 式において m_0, l, x および t がそれぞれ α 倍されたとすると

$$\left(\frac{m_0 \pi^2}{4 l^2 p_a}\right) \frac{\partial p}{\partial t} = \left(\frac{\alpha t \cdot \alpha l^2}{\alpha m_0 \cdot \alpha x^2}\right) \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (P + p_a) \frac{\partial p}{\partial x} \right\} \dots (26)$$

となり

$$\alpha t = \frac{\alpha x^2}{\alpha l^2} \alpha m_0 = \alpha m_0$$

であればガス圧分布は変わらない。これは

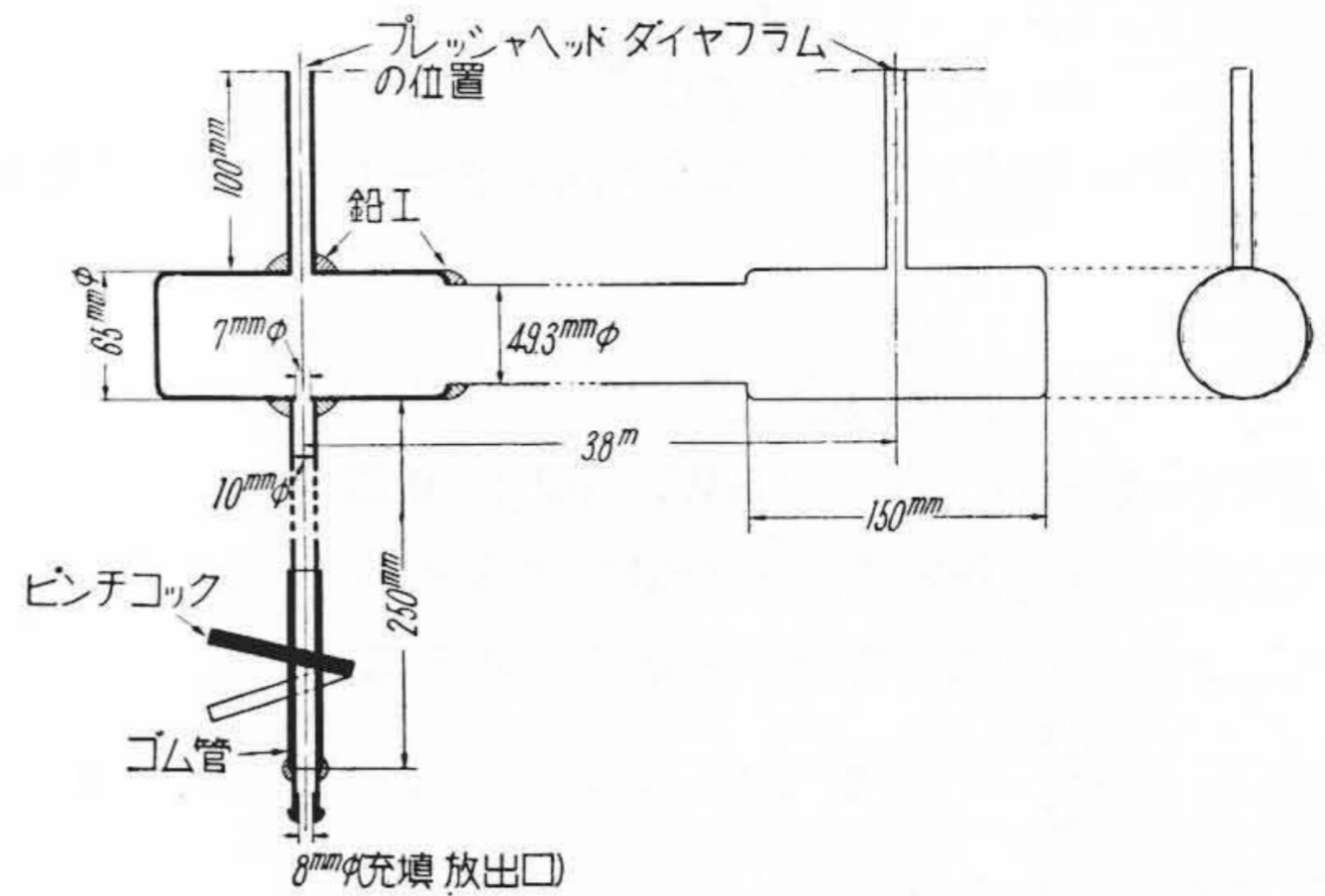
$$\frac{t}{m_0} = b \dots (27)$$

とも書け b が定数である以上、ケーブルのガス圧分布は変わらない。この b は無次元の定数である。

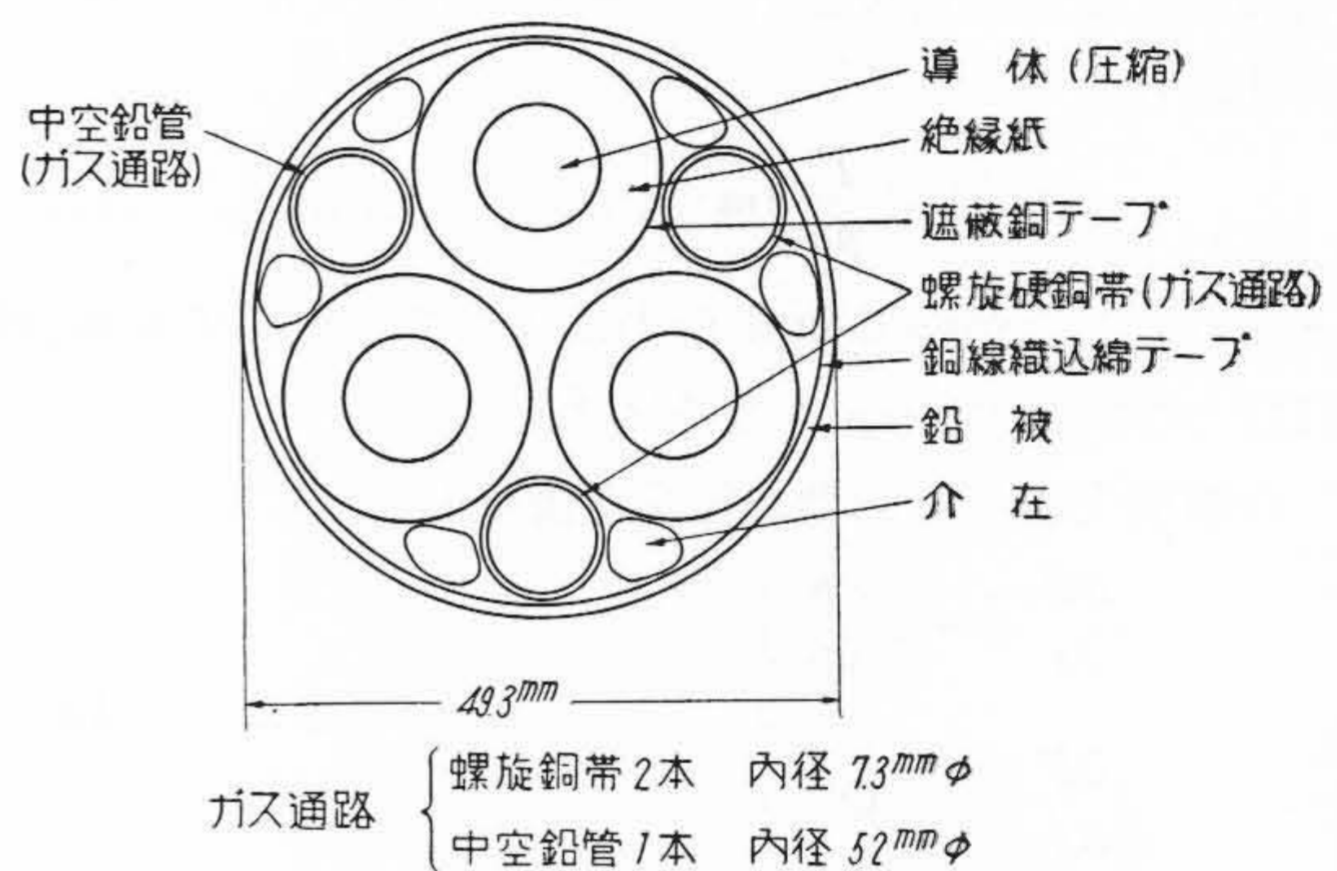
(4) 任意条長ケーブルのガス充填、放出特性の推定
異なつた長さのケーブルを同じ条件でガス充填および放出する場合、 m_0 をケーブル条長 l の函数として表わすことができれば

$$t = m_0 b = f(l) b$$

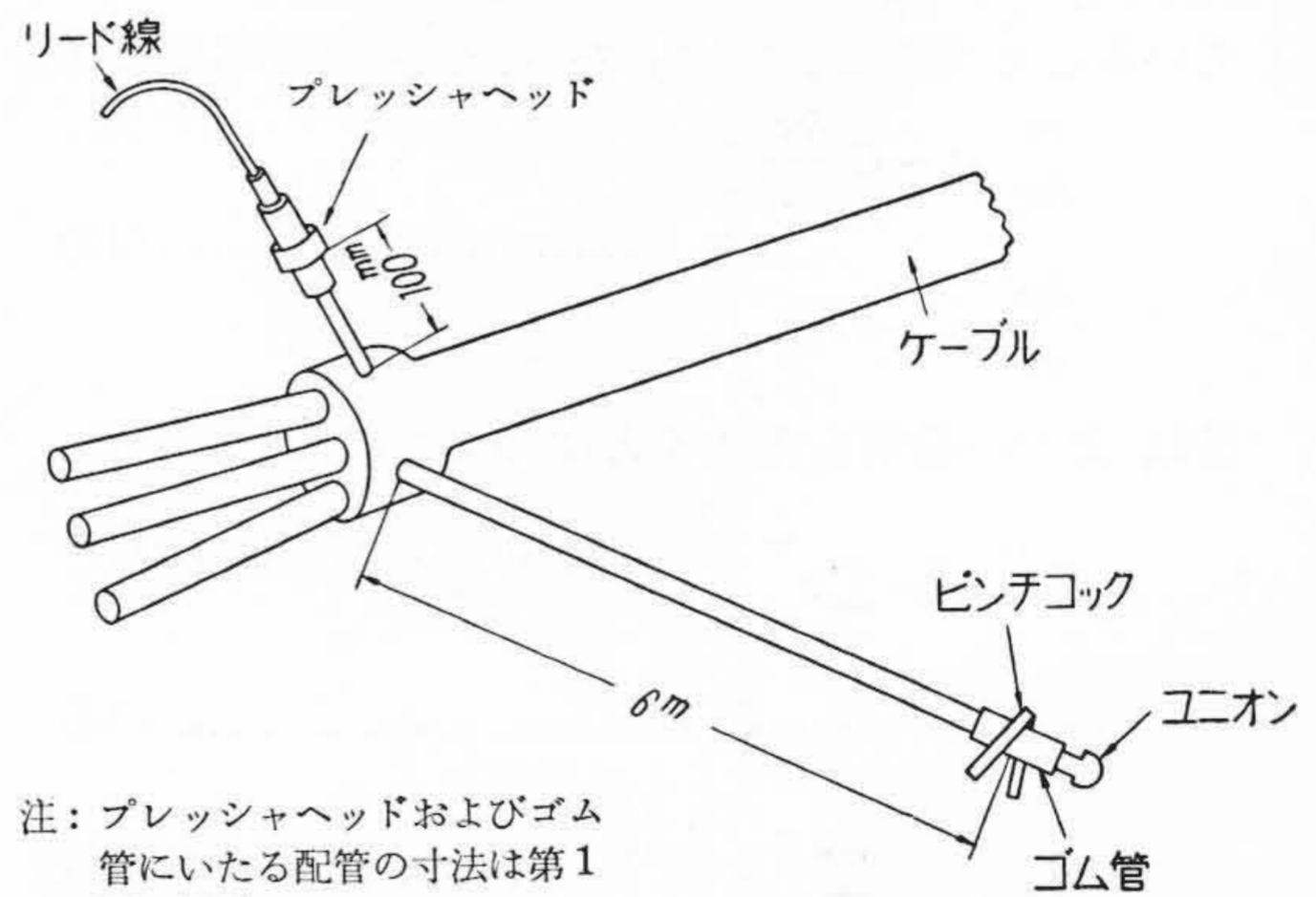
となり、 l を知つてガス充填、放出に必要な時間 t がわかる。また l の函数として m_0 が求まれば m が知られ大略



第1図 短尺ケーブルの端末構造



第2図 20 kV 50 mm² 3心低ガス圧ケーブルの断面



第3図 長尺ケーブルの端末構造

のガス充填および放出特性がわる。

(5) 伝達時定数 m , 流通時定数 m_0 の物理的意味
 m は圧力伝達時間の大小を表わすもので、末端の圧力が飽和圧力の約50%に達する時間を示す。

m_0 は m が圧力によつて変化するのに対し、圧力に無関係な一定数でガス充填・放出時間の大小を表わし、充填および放出に要する時間の $\frac{1}{b}$ を示す。なお両定数とも単位は秒である。

〔III〕 ケーブルのガス圧伝達

(1) 実験に使用したケーブル

(a) 短尺ケーブル

長さ3.8 mの20 kV 50 mm² 3心低ガス圧ケーブルを使用した。その端末構造を第1図に、ケーブルの構造を第2図に示す。

(b) 長尺ケーブル

長さ95 m および 340 m の20 kV 50 mm² 3心低ガス圧ケーブルをドラム巻の状態を試験した。ガス充填、放出口の構造を第3図に示す。

(2) ガス圧伝達の測定

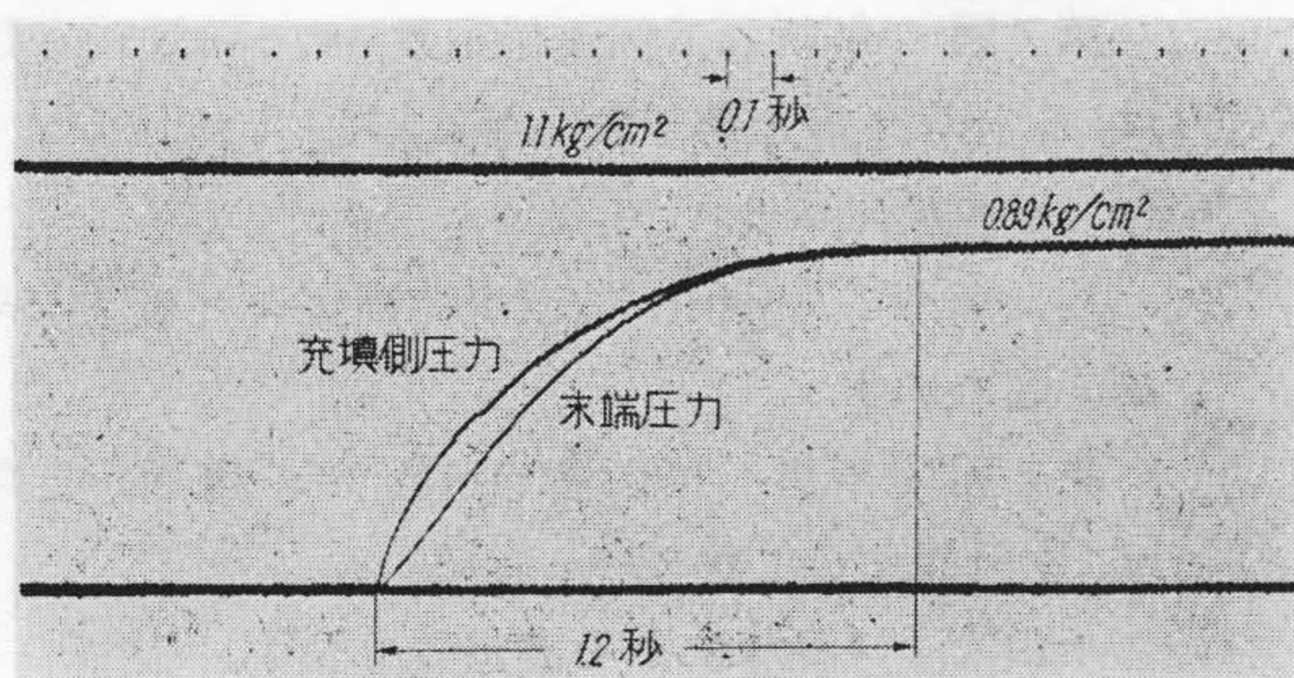
短尺ケーブルでは、一端よりガス充填、放出を行う場合にガス圧力の伝達時間が短いので水銀マンメータまたはブルドン管応用の圧力計は使用できないので抵抗線歪計を応用したプレシヤ・ヘッドを用い電磁オシログラフで記録した。長尺ケーブルではプレシヤ・ヘッドのほかに水銀マンメータを併用した。

(3) 短尺ケーブルのガス圧伝達

(a) ガス充填特性

短尺ケーブル3.8 mmの充填特性オシログラムを第4図に示す。

第4図を解析して伝達時定数 m 、流通時定数 m_0 を



第4図 短尺ケーブルのガス充填特性

第1表 ガス充填特性の解析結果(短尺ケーブル)

充填時間 t (s)	末端圧力 P (kg/cm ²)	伝達時定数 m (s)	流通時定数 m_0 (s)
0	0	—	—
0.1	0.16	0.23	(0.27)
0.2	0.31	0.30	0.40
0.3	0.44	0.33	0.49
0.4	0.57	0.31	0.52
0.5	0.66	0.31	0.54
0.6	0.74	0.30	0.54
0.7	0.81	0.27	0.51
0.8	0.85	0.25	0.49
0.9	0.87	0.22	0.42
1.0	0.88	0.21	(0.39)
1.2	0.89	—	—

注：()は過渡状態における値であるから省略
 $P_0=0.89$ kg/cm², $m_0=0.49$ 秒, $b=2.4$
 実際条長: 3.8 m, 等価長: 6.8 m

計算すると第1表となる。

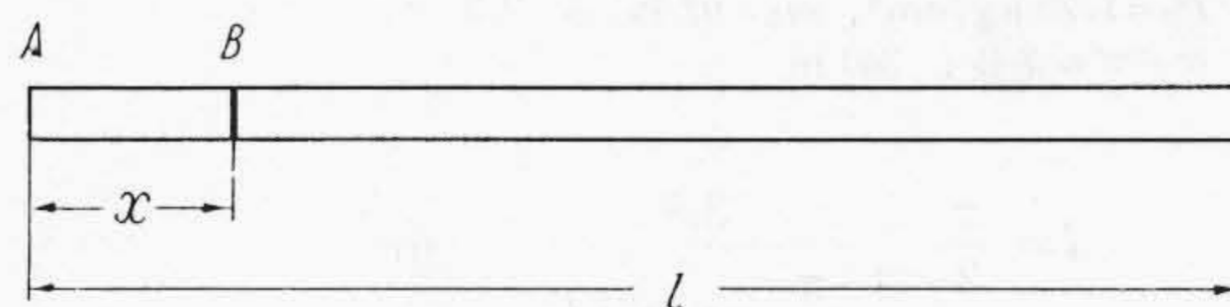
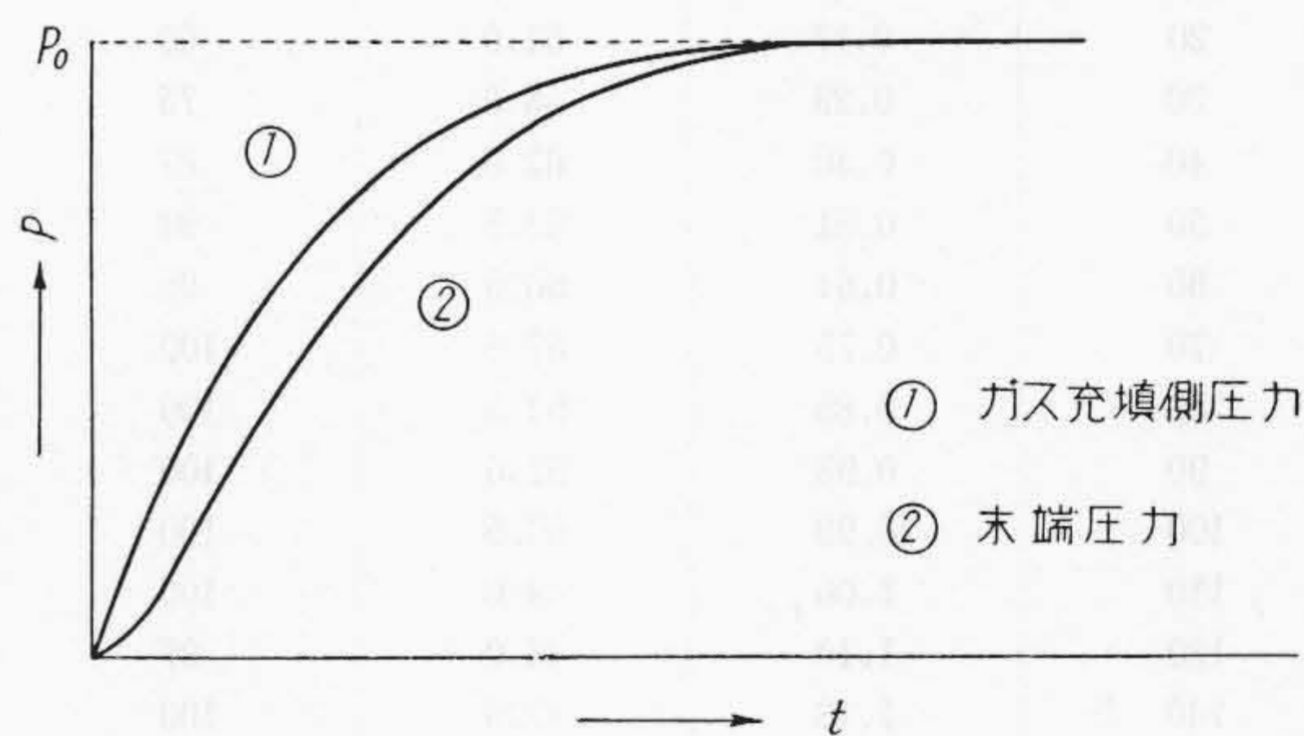
この表中の m , m_0 の記号については前述したが、 b および等価長について述べる。

b はレイノルズ数のようなもので圧力伝達の相似則を示す数である。無次元で $\frac{t}{m_0} = b$ の関係があり、 b が一定ならば圧力分布は変わらない。

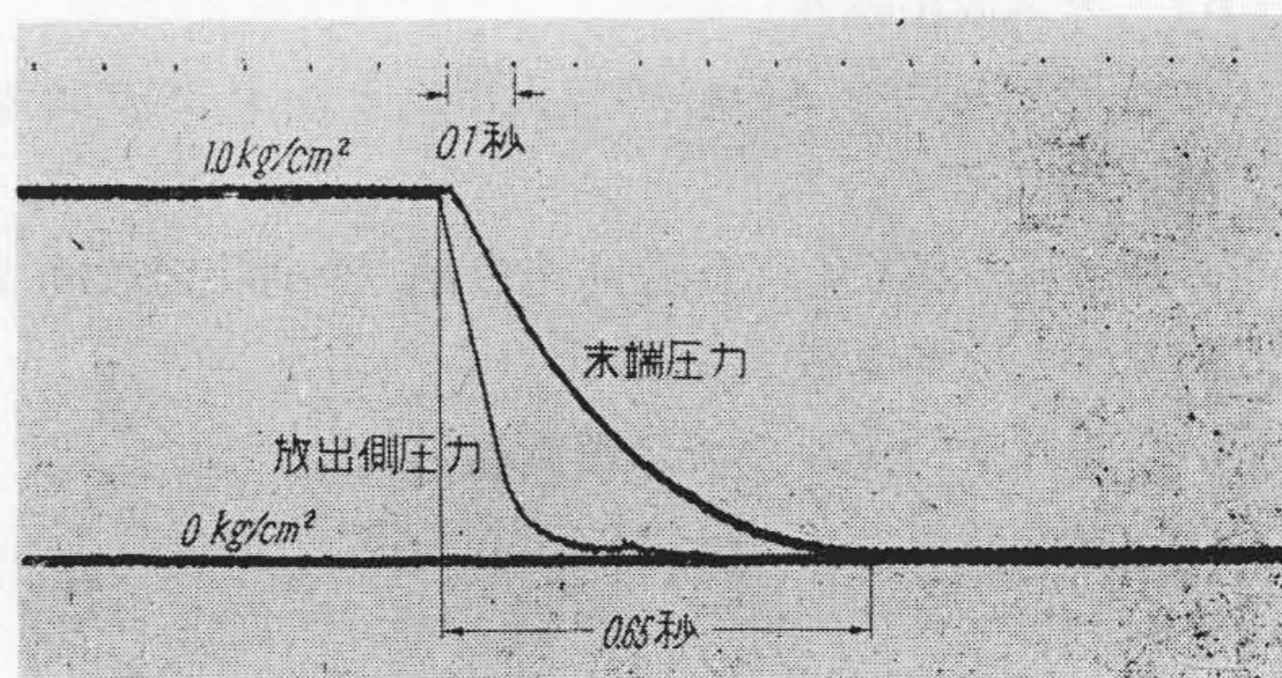
等価長は、ガス充填、放出においては $t=0$ で圧力 P_0 を急に加えたときと仮定してあるが実際には第5図のように時間によつて変化する。これは解析に不便であるから次のように仮定する。すなわち①の曲線は長さ l の管の充填端より x だけへだたつた点 B における圧力時間曲線とする。そして A 点の圧力を急に P_0 にしたとき x 点の $P-t$ 曲線が①になるような x を求め、これを実際のケーブル条長に加えたものである。

$$\frac{P(x, t)}{P_0} = \frac{\sin \frac{\pi x}{2l}}{\sin \frac{\pi}{2}} = C$$

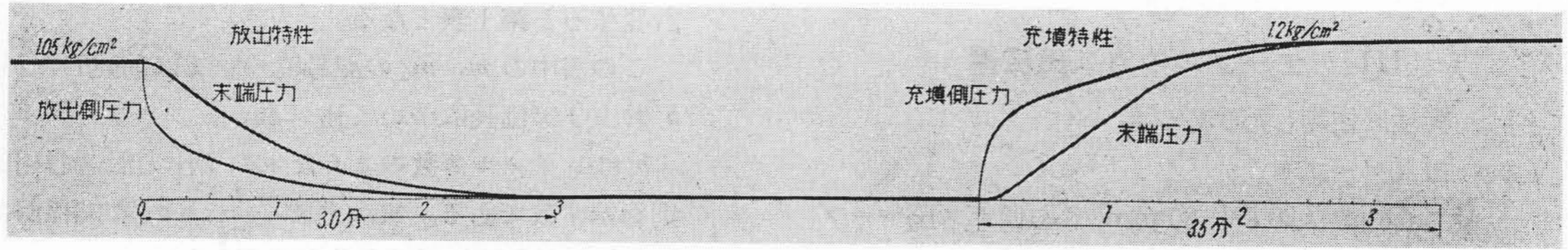
となる C を知つて



第5図 短尺ケーブルにおけるガス充填特性の解析



第6図 短尺ケーブルのガス放出特性



第7図 長尺ケーブルのガス圧過渡特性

第2表 ガス放出特性の解析結果 (短尺ケーブル)

放出時間 t (s)	末端圧力 P (kg/cm ²)	伝達時定数 m (s)	流通時定数 m_0 (s)
0	1.00	—	—
0.1	0.74	0.18	0.23
0.2	0.44	0.19	0.30
0.3	0.26	0.19	0.33
0.4	0.13	0.18	0.34
0.65	0	—	—

$P_0=1.0$ kg/cm², $m_0=0.30$ 秒 $b=2.2$
 実際条長: 3.8 m, 等価長: 4.1 m

第3表 ガス充填特性の解析結果 (長尺ケーブル)

充填時間 t (s)	末端圧力 P (kg/cm ²)	伝達時定数 m (s)	流通時定数 m_0 (s)
0	0	—	—
20	0.17	51.0	60
30	0.29	58.0	75
40	0.40	62.0	87
50	0.51	62.5	94
60	0.64	60.0	98
70	0.75	57.5	100
80	0.85	54.5	100
90	0.93	52.0	100
100	0.99	50.5	100
110	1.06	49.0	100
120	1.10	46.0	97
140	1.13	47.5	100
150	1.16	42.5	92
160	1.17	42.0	91
180	1.18	42.5	92
210	1.20	—	—

$P_0=1.20$ kg/cm², $m_0=92$ 秒, $b=2.3$
 ケーブル条長: 340 m

$$l = \frac{\pi}{2} = \frac{3.8}{\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} C} \quad (m)$$

として求まる。

(b) ガス放出特性

短尺ケーブル 3.8m の放出特性オシログラムを第6図に示す。

第6図を解析して伝達時定数 m , 流通時定数 m_0 を計算すると第2表となる。

(4) 長尺ケーブルのガス圧伝達

(a) プレシヤ・ヘッドによる測定

(i) ガス充填特性

長尺ケーブル 340 m の充填特性オシログラムを

第4表 ガス放出特性の解析結果 (長尺ケーブル)

放出時間 t (s)	末端圧力 P (kg/cm ²)	伝達時定数 m (s)	流通時定数 m_0 (s)
0	1.05	—	—
20	0.86	45	53
30	0.72	48	64
40	0.60	50	72
50	0.49	50	78
60	0.40	50	82
70	0.32	49	85
80	0.25	48	87
90	0.19	46	85
100	0.14	44	84
110	0.10	43	84
120	0.08	42	83
140	0.04	40	83
160	0.02	38	77
180	0	—	—

$P_0=1.05$ kg/cm², $m_0=78$ 秒, $b=2.3$
 ケーブル条長: 340 m

第7図に示す。

第7図を解析して伝達時定数 m , 流通時定数 m_0 を計算すると第3表となる。

(ii) ガス放出特性

長尺ケーブル 340m の放出特性オシログラムを第7図に示す。

第7図を解析して伝達時定数 m , 流通時定数 m_0 を計算すると第4表となる。

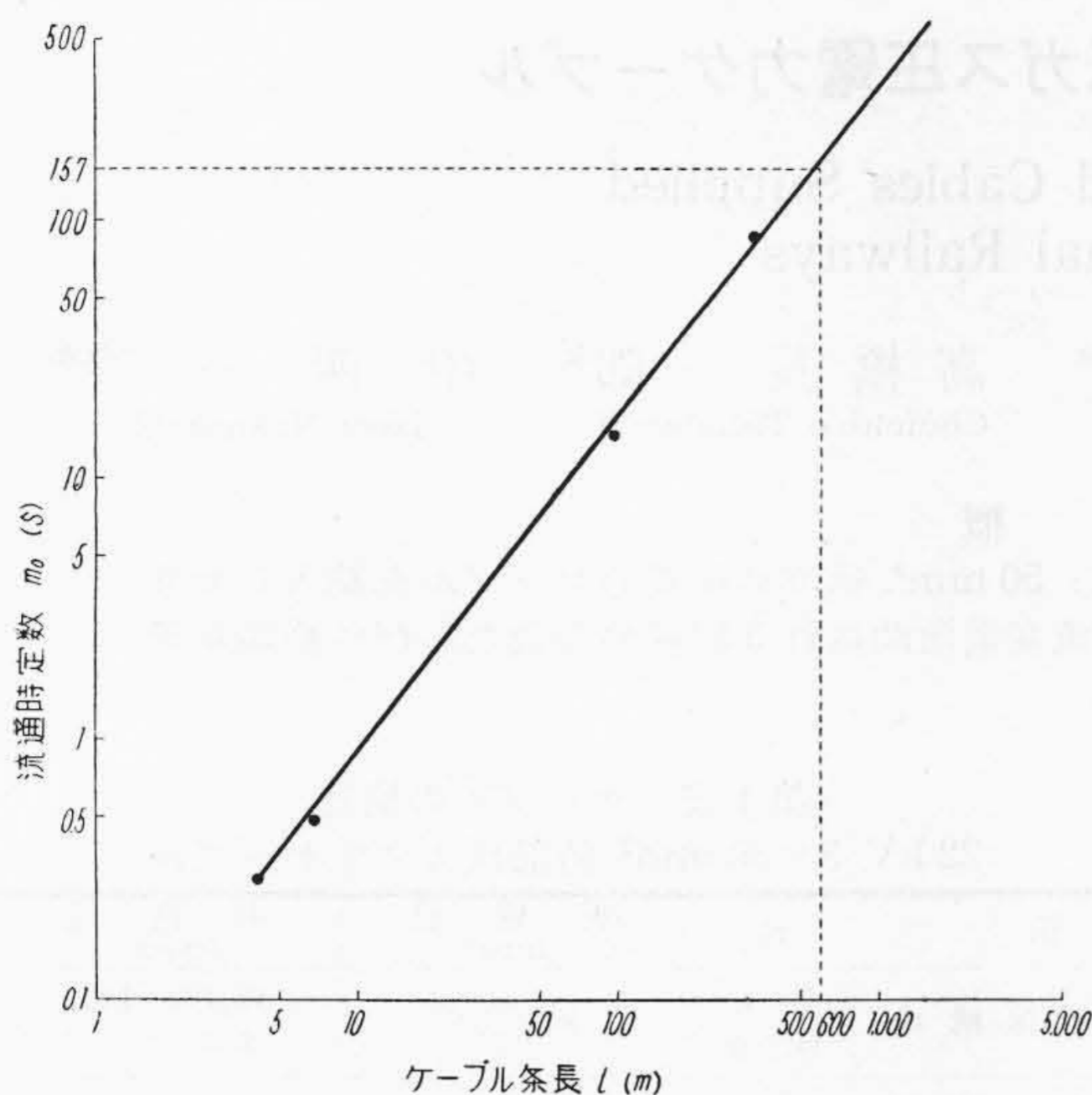
(b) 水銀マンオメータによる測定

これはプレシヤ・ヘッドによる測定とまったく同じ結果を得ることができた。また長さ95mのケーブルについても測定した。

以上の結果より、流通時定数 m_0 はガス圧力の過渡時間がある程度以上になるとほぼ一定となつている。時間の小さな範囲で m_0 が一定とならないのは近似式を用いる以上やむを得ない。

なお、前述したガス圧伝達の理論はガス流が層流をなす場合についてのみ成立する。ケーブルにおいては、ガス充填、放出時にガス流は層流をなすものとして取り扱ってきたが、一般的にこれが正しいことはオシログラムより示される。

m および m_0 の物理的な意味は前述したが実際の結果においてもこのことが成立することが示される。

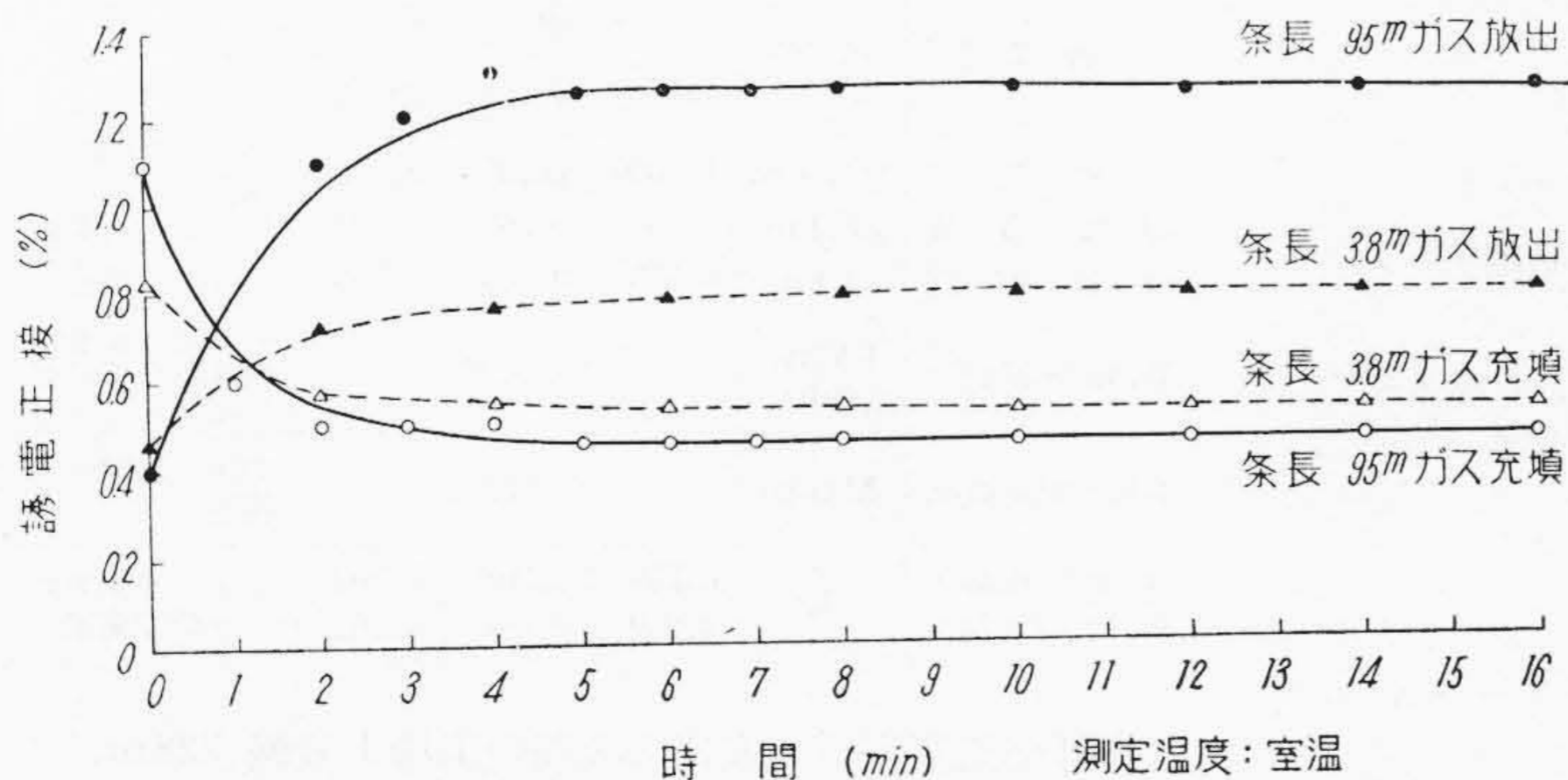


第8図 ケーブル条長 l と流通時定数 m_0 との関係

次に (27) 式に示した相似則はガス充填, 放出口が第1図のような場合に $b=2.3$ となり成立することが認められる。したがってこの場合 m_0 はガス充填, 放出に要する時間の $\frac{1}{2.3}$ を表わす。流通時定数 m_0 がケーブル条長 l のいかなる函数であるかを知ることが非常に有用であることはいうまでもないが, この関係を理論的に誘導することは困難なので実験値より求めた。これを第8図に示す。

[IV] ケーブル半径方向のガス圧伝達と電気特性

ケーブルのガス圧を大気圧より 1 kg/cm^2 に充填した場合および 1 kg/cm^2 より大気圧に放出した場合の誘電正接の変化を測定した。印加電圧はこのケーブルのイオン化開始電圧以上の値 (25.4 kV) に一定に保つた。前記のケーブルについて測定したがこの程度の条長ではいずれも約6分で誘電正接は定常状態となることがわかった。その結果を第9図に示す。



第9図 ガス圧過渡による誘電正接の変化

ケーブル条長が長くなると軸方向のガス圧は短時間では定常状態とならないから当然半径方向のガス圧伝達時間に遅れを生じることが考えられる。この長さは第8図より約600m以上であることが推定できる。

[V] 結 言

以上述べたことを要約すると次のようになる。

- (1) ガスケーブルにおけるガス圧伝達の理論を求め実験結果と一致することをたしかめた。
- (2) ガス圧伝達の過渡変化を表わすのに便利な定数 m (伝達時定数) および m_0 (流通時定数) を定義し, この物理的な意味を明らかにし, ガス充填口および放出口が第1図のような場合について相似則の成立することをたしかめた。
- (3) ガス充填および放出口が第1図の場合についてケーブル条長 l と流通時定数 m_0 の関係を示すグラフを得た。
- (4) (2) および (3) の結果として次のことがわかる。
 - (i) ガス充填口および放出口の構造が同一であれば任意条長ケーブルのガス充填特性および放出特性がわかる。
 - (ii) ガス充填および放出に要する時間がわかる。
- (5) ケーブル半径方向のガス圧伝達特性は誘電正接測定の結果によれば, ある条長以下の長さではほとんど一定であることがわかる。

終りにのぞみ, 種々御指導をいただいた日立電線株式会社電線工場の関係各位および研究に協力された森脇君に感謝の意を表するしだいである。

参 考 文 献

- (1) 酒井: 電力, 38, 1059 (1954)
- (2) H. Kuhman: F. & G. Rdsch., 38, 271 (1955)
- (3) Sten Lidén, A.R. Petré, Sture Swenson: TELE., 3, 139 (1955)
- (4) C. J. Beaver, E. L. Davey: J. I. E. E., 91, Part II, 35 (1944)
- (5) 斎藤: 藤倉電線技報, 7号, 97 (1955)
- (6) 今井, 中西: 電四学連大, 503 (昭32)
- (7) たとえば 電気学会編: 過渡現象論, 113 (昭31-9 電気学会)