

空気遮断器の大電流遮断現象の考察

Consideration on High Current Interrupting Performance of the Air Blast Circuit Breaker

高 砂 常 義*

Tsuneyoshi Takasuna

内 容 梗 概

空気遮断器は他力消弧方式であるから、大電流の遮断性能はおのずから限度がある。これはノズル形の空気遮断器ではノズル閉塞現象が重要な原因であるので、熱力学的ならびに実験的に検討した。その結果、閉塞現象の起る限界の電流値はノズル面積に比例し、電極間距離に逆比例することが再確認され、遮断不能限界の電流と閉塞限界の電流との関係も明らかとなった。

1. 緒 言

空気遮断器(以下 A. B. B. と略称)は圧縮空気を用いた他力消弧方式であるので、その遮断性能は圧縮気流の性質と密接な関係にあつて、一般的には、比較的小電流に対する遮断性能はきわめて良好であるが、過大の短絡電流に対しては明瞭な遮断性能の限界がある。通常、遮断の成否は、そのときの再起電圧と絶縁耐力との比較によって決まり、再起電圧上昇率が低いほど遮断しやすいが、同一の再起電圧および電流であっても、絶縁回復速度が低い場合は遮断が困難となる。絶縁回復速度を決める因子はいろいろあるが、大電流遮断時は特に極間の残留アークガスが重要な影響を与えると考えられる。たとえばノズル形 A. B. B. で小電流を遮断したときのアークは気流に沿って、すなわち発生し消滅する。大電流になるとアーク柱の太さを増すばかりでなく、いわゆるノズル閉塞現象を生じ、ついには電流零値以後において十分な絶縁回復が得られず遮断不能となる。

従来から大電流遮断性能を決定する一つの因子として電流遮断後の残留電流が取り上げられ、多くの測定結果が発表されているが⁽¹⁾⁽²⁾、いまだに十分な結論は得られていない。実際に A. B. B. を製作するにあたっては、もっと具体的に構造と性能との関係を明らかにすることが必要で、日立製作所では実試験、新等価試験⁽³⁾およびモデル試験などを実施し、もっとも能率的な構造を決定している。これらの結果の理論的裏付けは流体力学および熱力学を必要とするが、日立製作所では早くから高速度カメラ、高速度ピンホールカメラ、シュリーレン装置などを駆使して基礎的な研究を行ってきた。その結果は多くの製品の中に取り入れられ、多大の成果を収めた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本論文は基礎的研究のうち、大電流遮断性能に関して述べたもので、その一部はすでに発表⁽⁷⁾したものである。

2. ノズル閉塞現象の理論的考察

2.1 閉塞現象と閉塞限界

ノズルを有する普通の軸方向吹付形 A. B. B. では、遮

* 日立製作所日立研究所

断部に発生したアークエネルギーは大部分気流によって持ち去られる。単位時間当り発生するアークエネルギー(すなわちアークパワー)の小さいうちは、常時アークパワーの全部がノズルから放出されている。電流が増加すると、アークパワーも増加するが、気流の持ち去るパワーはノズルによって制限をうけるため、ある値以上のパワーはノズルから放出しきれずに遮断部内に蓄積される。このエネルギー蓄積が起ると、アークによる高温ガスが遮断部内に充満する。この現象をノズル閉塞現象といい、閉塞現象が始まる限界を閉塞限界と呼んでいる。閉塞が起ると、アークの残存ガスのために絶縁回復が弱められ、遮断性能を低下させる。たとえば、交流の場合電流零値において、なお閉塞したままでは、遮断することは不可能となる。このようにノズル閉塞現象は大電流遮断性能と直接的な関係を持っている。もちろん遮断性能は遮断後極間に出現する再起電圧およびその固有周波数に関係するが、これらの電圧の条件が著しく緩和されていても、電流零値において遮断部がアークガスで閉塞しているときは極間の絶縁を十分回復させることができない。

次に、閉塞現象を起す電流値を熱力学的に求めてみよう。

2.2 閉塞限界電流の理論式

2.2.1 アークから発生するパワー

高圧気中のアーク電位傾度は近似的に次式で与えられる。

$$X = X_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^n$$

ここに、 X : 高圧気中の電位傾度 (V/cm)

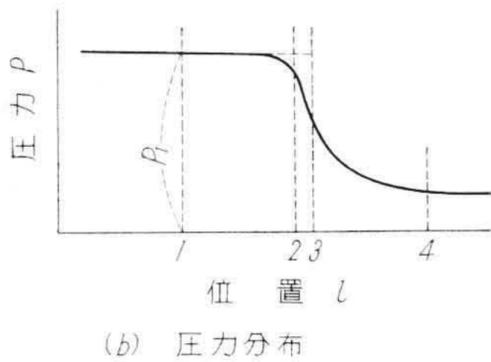
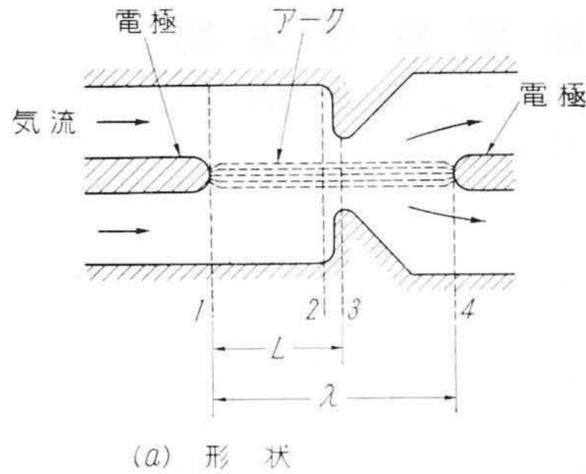
X_0 : 大気中のアーク電位傾度 (V/cm)

P : アーク周囲媒質の絶対気圧 (ata)

P_0 : 大気圧 (=1 ata)

n は圧力によるアーク電位傾度への影響を示す指数で、電流が大きいとほぼ 0.5 である。

気流中におかれたアークはその大半のエネルギーを空気中に放出し、電極への熱伝導により失われるエネ



第1図 単一ノズル形 A. B. B. の形状と圧力分布

ルギーはわずかであるので、ここでは電極降下の部分を除き、アーク柱の電力はすべて空気中に放出されていると仮定する。

第1図(a)は単一ノズルを有する A. B. B. 遮断部を図示したものである。この場合のアーク柱の電力は、

$$Q_a = XLI \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 Q_a : 空気に放出されるアーク柱の電力(W)
 L : ノズルより上流のアーク長 (cm)
 I : アーク電流 (A)

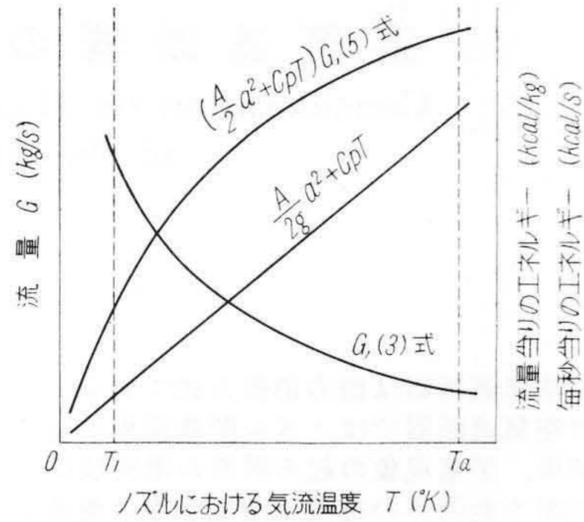
で表わされる。電位傾度 X は長さ L の範囲の平均値で高速気流中では大きな値をとるが、ノズルの形状から高速気流にさらされているアークはノズル付近のわずかの部分にすぎないと考えられるので、 X としては静止高圧気中の値を用いてもよいであろう。

2.2.2 ノズルから放出される流量とエネルギー

比較的良好に作られたノズルから放出される単位時間当りの流量は、遮断部内の圧力が約 2 ata 以上あれば、次式で示される⁽⁸⁾。

$$G = \eta \frac{P}{RT} S a = \eta \sqrt{\frac{kg}{RT}} PS \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 G : 単位時間当りノズルから放出される流量 (kg/s)
 η : ノズルの流量放出係数 (約0.6~1.0)
 P : 遮断部における絶対圧力 (kg/m²)
 S : ノズル面積 (m²)
 R : 気体常数 (=29.27 kgm/kg, °K)
 T : ノズルにおける気体温度 (°K)
 a : 温度 T における音速 (\sqrt{kgRT})



第2図 気流温度と流量およびエネルギーとの関係

k : 定圧比熱と定積比熱との比
 g : 重力加速度 (=9.8 m/s²)

η はノズル面積と遮断部面積との比、すなわちノズルへの気流の近寄り速度によってほぼ決まる常数である。また遮断部の圧力 P は通常第1図(b)に示すようにノズル付近で急速に低下しているが、ノズルへの近寄り速度が増加したためであるから、 P としては近似的に P_1 の値を使用し、アーク柱の断面積はノズル面積に比べて無視できるとする。

次に、単位流量の気体の持つエネルギーは速度エネルギーと気体の持つ仕事量と内部エネルギーとの和として表わせる。すなわち、

$$Q = \frac{Au^2}{2g} + APV + U = \frac{Au^2}{2g} + C_p T \dots\dots (4)$$

ここに、 Q : 単位流量の気体の持つエネルギー (kcal/kg)
 A : 仕事の熱当量 ($\frac{1}{427}$ kcal/kgm)
 u : 流速 (m/s)
 V : 比体積 (m³/kg)
 U : 内部エネルギー (kcal/kg)
 C_p : 定圧比熱
 $C_p T$: エンタルピ (= $APV + U$)

したがって、毎秒当りノズルから放出される流量の持つエネルギーは、(3)式と(4)式とから、 $u \rightarrow a$ とし、

$$\left(\frac{A}{2g} a^2 + C_p T \right) G \text{ (kcal/s)} \dots\dots\dots (5)$$

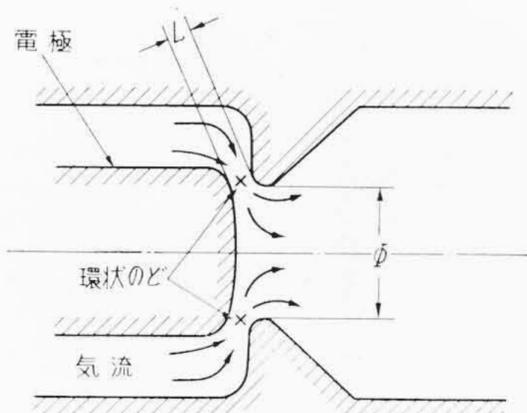
となる。第2図はノズルにおける気流温度と放出される気体の流量およびエネルギーとの関係を示す。

2.2.3 エネルギー平衡の条件

エネルギー保存則と連続の法則とから、第1図に示した A. B. B. 遮断部の境界 1 と 3 との間の空間について平衡条件を求めると、

$$\text{(流入気体のエネルギー)} + \text{(アークエネルギー)} = \text{(放出気体のエネルギー)}$$

である。もし、(左辺) > (右辺) のようになると、平衡



第3図 環状喉

が破れて遮断部にエネルギーの蓄積が起る。(すなわち閉塞する)。それゆえ、上の条件を式で示すと(2)および(5)式より、

$$\left\{ \frac{A}{2g} (a_3^2 - u_1^2) + C_P (T_3 - T_1) \right\} G = BQ_a \dots (6)$$

ここに、 B : 電力の熱当量 ($= \frac{1}{4.2}$ cal/W.S)

接尾数字 1, 3: 第1図(a)に示した位置 1, 3における値。

となる。閉塞しないときは常に(6)式が成立している。

2.2.4 ノズルの閉塞限界

(2)(3)(6)式から電流 I は、

$$I = \frac{\frac{A}{2g} (a_3^2 - u_1^2) + C_P (T_3 - T_1)}{BLX} \cdot \eta \sqrt{\frac{kg}{RT_3}} P_1 S$$

となる。閉塞限界付近では明らかに、 $a_3 \gg u_1$, $T_3 \gg T_1$ である。また T_3 は通常アーク電流とともに増加するが、アーク柱内の気体温度 T_a より増加することができない。したがって上式の右辺の値は限度があり閉塞限界電流 I_m が決まる。 k の値として温度 $5,000^\circ K$ の空気に対する値(1.32)を用いると、

$$I_m = 47\eta \frac{Pa_a}{X} \cdot \frac{S}{L} = 920\eta \sqrt{T_a} \frac{P}{X} \cdot \frac{S}{L} \dots (7)$$

ここに、 I_m : 閉塞限界電流(A)

T_a : アーク柱内の気体温度 ($^\circ K$)

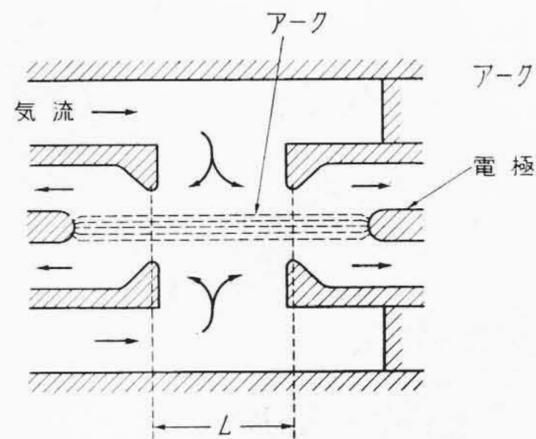
a_a : T_a に対する音速 (m/s)

で表わされる。この式から、閉塞限界はノズル面積に比例し、極間距離にほぼ逆比例すること、ノズルにおける気体温度の平方根に比例すること、 $\frac{P}{X}$ に比例すること、などがわかる。(1)式から、 $n=0.5$ ならば $\frac{P}{X} \propto \sqrt{P}$ となり、 $n=1$ ならば $\frac{P}{X} = \frac{P_0}{X_0} = \text{常数}$ となることがわかる。

2.3 考察

(1) 式(7)の適用限界

式(7)で L をできるだけ小さくすると、閉塞限界電流は限りなく大きくなるようにみえるが、実際には限



第4図 二重吹付形 A.B.B. の形状

度があって、ある値以下の L に対しては成立しない。その理由は、 L が非常に小さくなると、電極とノズルとの間に環状ののどが作られ、その断面積はノズル面積よりも小さくなり、そこで空気流量が制限されるからである。ノズルの直径と電極の直径がほぼ等しいときは、第3図に示すように環状ののどの面積は $\pi\phi L$ (ϕ : ノズル直径) であるから、

$$L \geq \frac{\phi}{4} \dots (8)$$

ならば、(7)式が適用される⁽⁴⁾。実際にはアークは環状ののどをふさぐことなくノズルの中に押し込められているので、(8)式の制限はもっと緩和されるであろう。

(2) 二重吹付形の場合

第4図に示すように二つのノズルがあるときは、ノズル間の距離を L 、ノズル面積の和を S とすれば(7)式はそのまま適用される。(8)式の条件も二つのノズル面積の和に等しい一つのノズルを想定し、その直径を ϕ とすればよい。

3. 閉塞限界の観測と結果

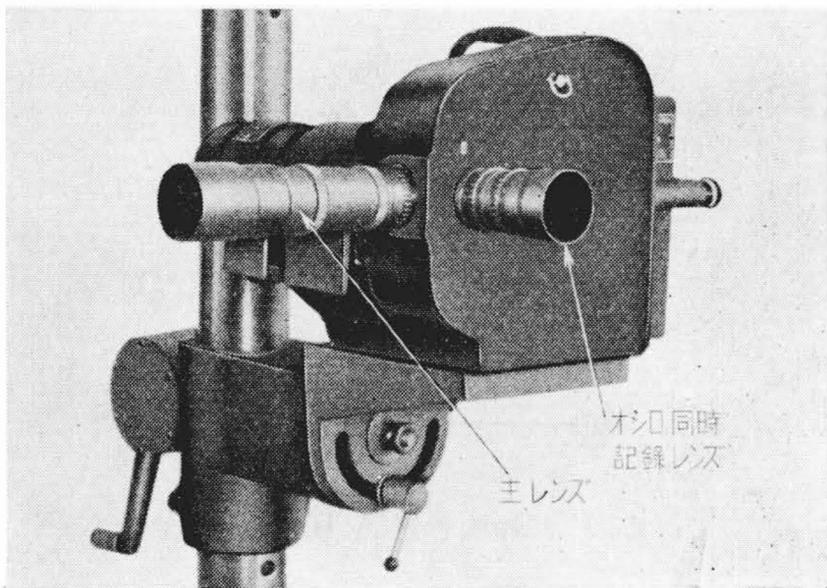
3.1 観測方法

遮断するときのアークの動きをカメラで撮影し、そのアークの広がり方から閉塞しているかどうかを判定する方法はもっとも簡単で便利である。カメラとしては、コダック 16 mm 高速度カメラ (3,000 コマ/秒)、高速度ピンホールカメラ (11,000 コマ/秒)、および 35 mm 1 眼レフカメラを使用した。第5図(A), (B)に 16 mm 高速度カメラおよび高速度ピンホールカメラの外観を示す。

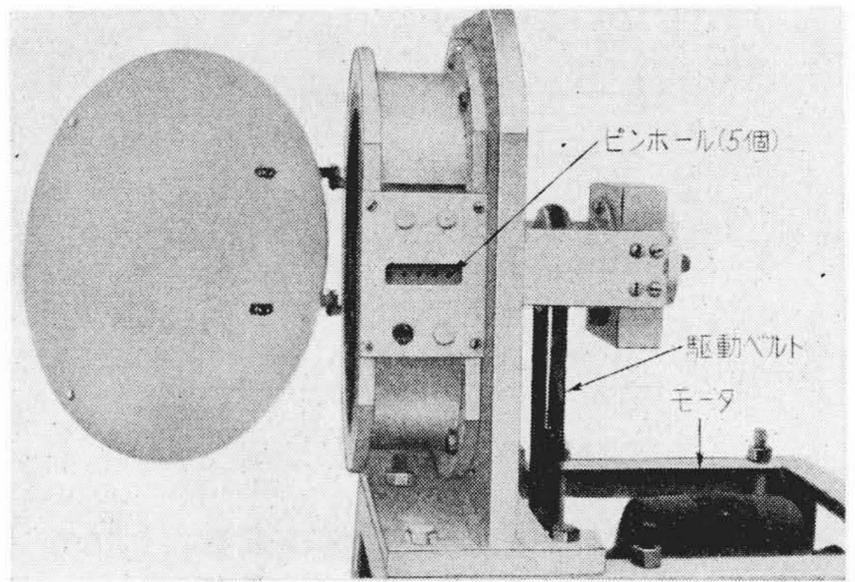
モデル A.B.B. は内部を透視できるように、透明な樹脂(またはガラス)製の遮断部で、その外側をさらに絶縁筒で補強してある。第6図は撮影方法を図示したものである。

3.2 観測結果の写真

適切なフィルタを用いた高速度カメラでアークを撮影すると、アークの動きが明瞭に観測される。また、比較

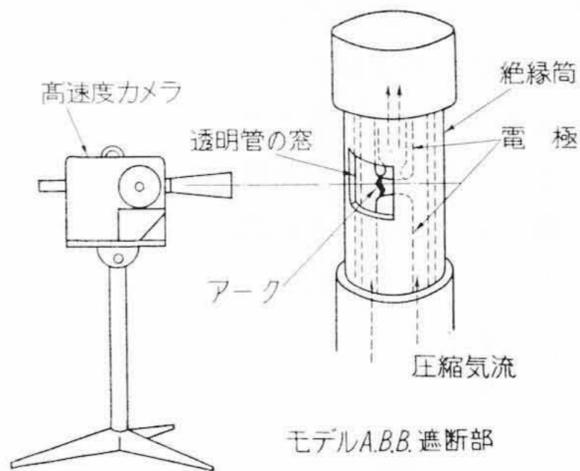


(A) 高速度カメラ(16mm)最高 3,000コマ/s



(B) 高速度ピンホールカメラ最高 11,000コマ/s

第5図 測定に使用したカメラ

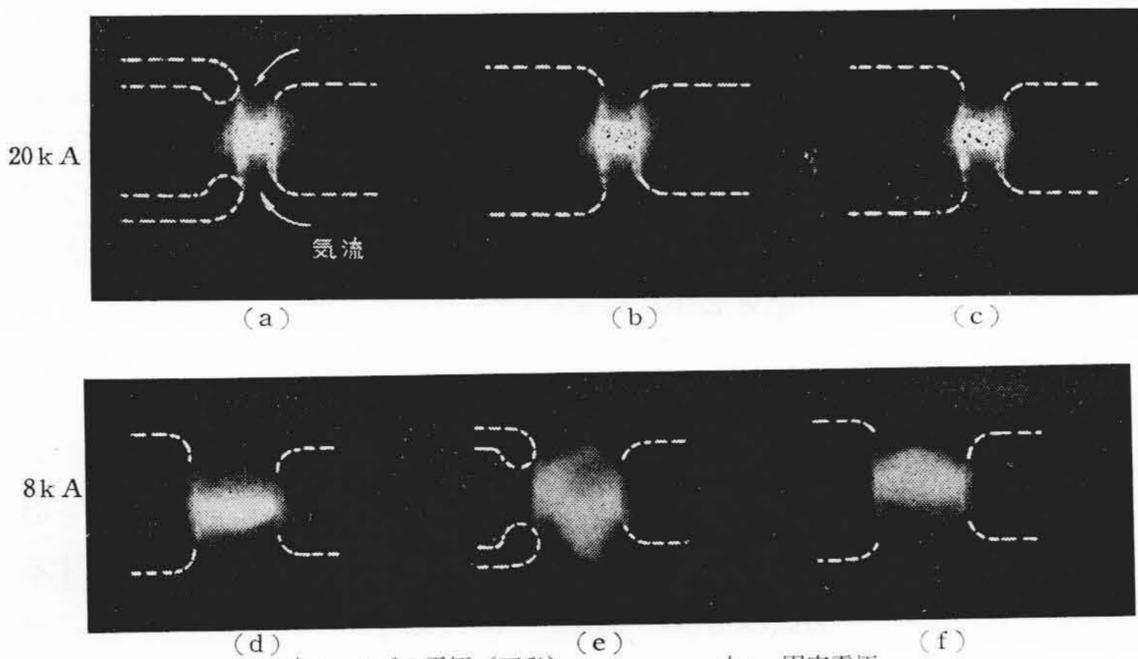


第6図 遮断時のアーク観測方法

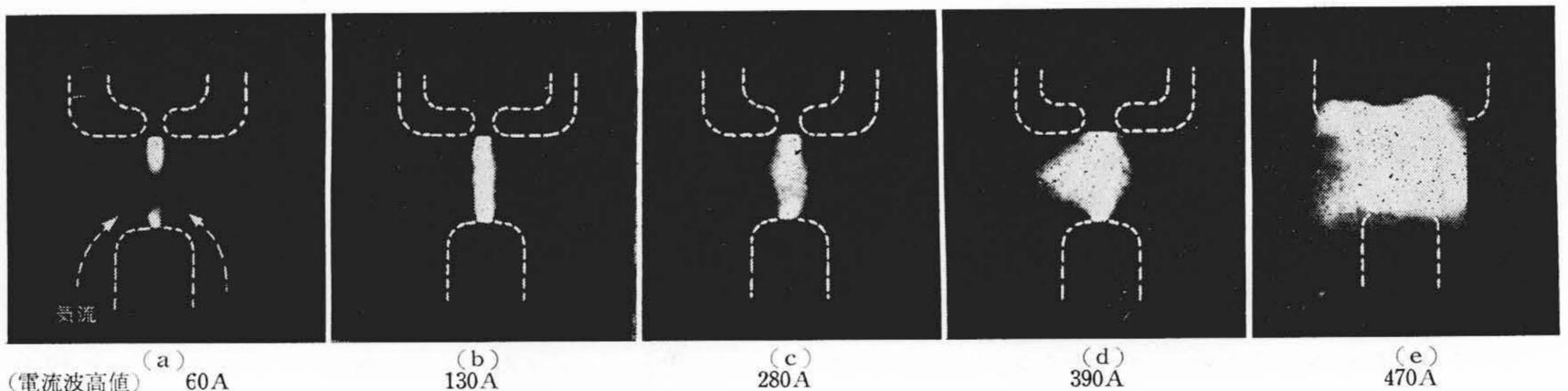
的長時間シャッタを開いていると、その間のアークの移動範囲を知ることができる。第7図は高速度カメラで撮影されたモデル A. B. B. のアークの状況である。いずれも1コマの間隔は約 0.35 ms, シャッタ時間は 70 μ s で撮影されたものである。(a)~(c)は 20kA に対して閉塞していない場合, (d)~(f)は 8kA に減少してもアーク長が大きいために閉塞している場合である。ここで明らかなように, (a)から(f)にいくにしたがい, 極間距離は次第に大きくなると, 閉塞する電流値は次第に減少する。そして閉塞したと思われるときのアークの動き

を見ると, 複雑な曲折や膨脹を起し, 時には分枝状になり不安定である。このような場合はほとんど遮断不能である。

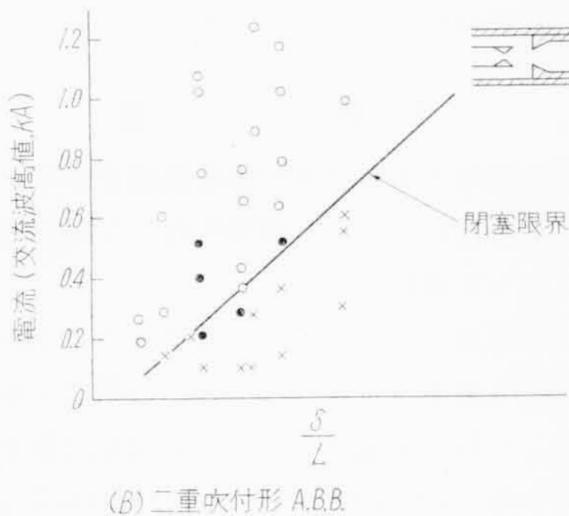
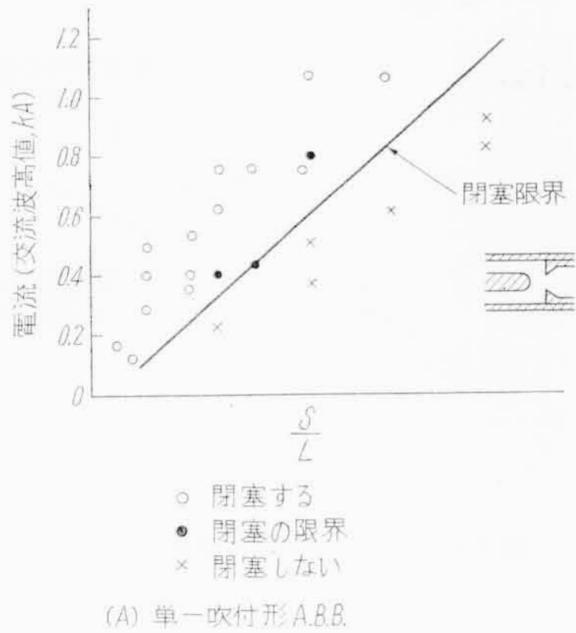
第8図は小規模のモデル A. B. B. で実験した例で, 極間距離を一定に保ち, ヒューズで点弧した。カメラはシャッタを一定時間開いてアークの移動範囲を撮影した。(a), (b)はまったく閉塞していないが(d), (e)は閉塞していることが明らかで, (c)はその限界付近であるから, 閉塞限界は約 300A と判定される。この方法は判定が容易であるが, アー



第7図 モデル A. B. B. の大電流アーク状況



第8図 小規模のモデル A. B. B. のアーク状況



第9図 モデル A. B. B の閉塞限界

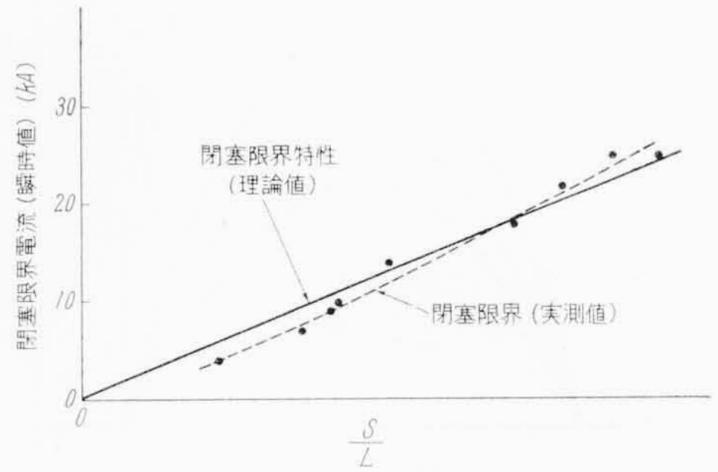
クの動きを正しく理解することは困難である。

3.3 実験結果

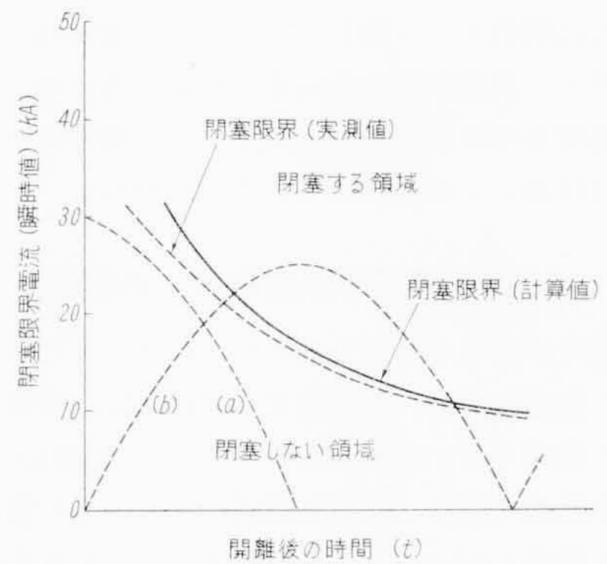
前述のような種々の電流値に対するアーク状況から、各瞬時に閉塞したか否かを判定すると、それから閉塞限界の電流値が求められる。

第9図は比較的小形のモデル A. B. B. による交流小電流の結果の例を示したもので、電源電圧は 420V 横軸には $\frac{S}{L}$ を取り、縦軸にアーク電流(波高値)をとる。(A)は C_u 電極の単一ノズル形についての実験結果で閉塞電流は $\frac{S}{L}$ にほぼ比例している。(B)は C_u 電極の二重吹付形についての結果で、これも二つのノズル面積の和を S とするとやはり $\frac{S}{L}$ にほぼ比例している。いずれの場合も $\frac{S}{L}$ が大きくなると閉塞限界は比例以上に増加する傾向がみられたが、これは遮断部断面積に対するノズル面積の割合が大きくなるにしたがい、ノズルの流量放出係数 η が増加するためであると考えられる。

第10図はモデル A. B. B. が交流大電流を遮断する際のアーク状況から、閉塞を開始する限界の電流とそのときの $\frac{S}{L}$ を示したものである。小電流のときの結果と同様にほぼ $\frac{S}{L}$ に比例している。比例常数も小電流の結果と大電流の結果とはほぼ一致している。



第10図 大電流の閉塞限界

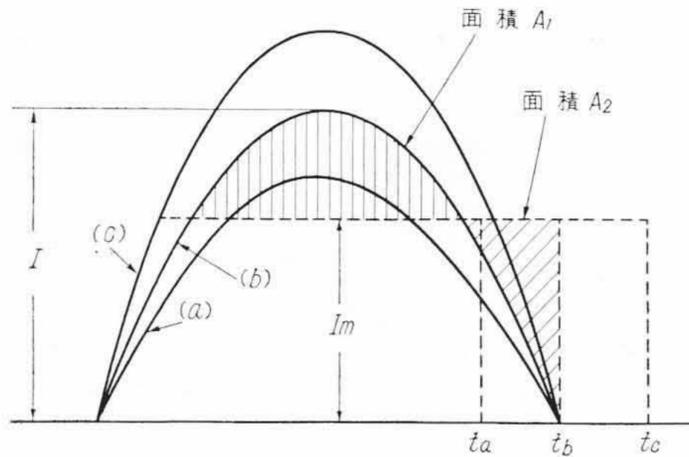


第11図 閉塞限界の時間的变化

閉塞限界は A. B. B. の接触子が開離してからフルストロークするまでの時間の関数であるから、開離後の時間を横軸にとって示した例が第11図である。これは第10図と異なった構造のモデル A. B. B. の遮断試験から得られたもので、操作圧力は 10 kg/cm² が使用された。実線は可動接触子のストローク特性から計算により求めた結果で、点線で示された実測結果と大体一致している。いずれにしても開離後の閉塞限界電流は時間が増すとともに低下するので、遮断開始時の電流位相により、閉塞の影響を受ける場合とうけない場合とがある。たとえば、(a)のような電流は閉塞限界以下であるために、ストロークは若干短くても遮断されるが、(b)のような電流は遮断すべき最初の電流零時にストロークが長く電流値も小さいにもかかわらず閉塞し、遮断不能となることがある。これは特に目新しいことではなく、従来からアークエネルギーの大小により論じられてきたことと同じである。

3.4 理論値との比較

前述の(7)式において、 η, T_a, P, X などの値を代入すれば、遮断部寸法に対する閉塞限界電流が求められる。アークガスの温度および電位傾度の値は測定者ならびに測定条件によってまちまちであるが、静止高圧中のデータと高速気流中のデータの両者とも、計算した結果は



第12図 電流零値の閉塞限界説明図

実験値と比較的よく一致している。その理由は、静止高圧中に比べて高速気流中では電位傾度が高いが、アークガスの温度もやはり高くなるので、比例常数はいずれの場合もほぼ同じになるためであると思われる。

4. 遮断限界と閉塞限界との関係

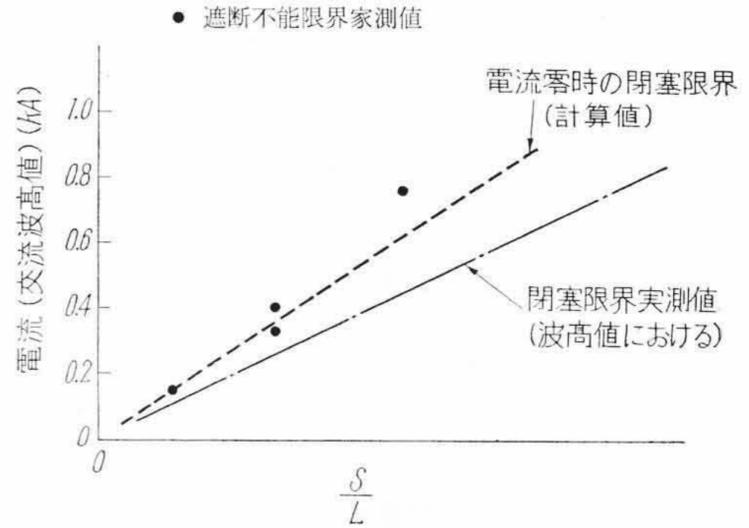
電流零時に遮断が可能であるか否かは、そのときの極間距離、気体の圧力、気体温度、再起電圧、残留イオン量などに関係すると考えられる。このうち残留イオン量、気体温度は閉塞と密接な関係にある。もし電流零値において閉塞していると、再起電圧を低くしても絶縁回復が十分でないために遮断不能になると考えられる。

第12図は交流半波を考え、閉塞が継続する時間を図示したものである。閉塞限界電流が I_m であるとき、(b)で示す電流が流れると、 I_m をこえた部分の電流から発生するエネルギーは放出しきれずに蓄積される。しかし電流が I_m 以下になったときに放出されるので、もし斜線部分の面積 A_1 が A_2 に等しい場合は、ちょうど電流零値(時刻 t_b)において閉塞が終ると考えられる。この電流の波高値 I は計算により、

$$I = 1.38 I_m \dots\dots\dots (10)$$

となることが知られる。直流分を含んだ電流に対しては、 I/I_m の比はもっと大きく、最大 1.63 になることが計算される。次に(b)より小さい電流(a)では、 t_a において閉塞が終るが、(b)より大きい電流(c)では t_c まで閉塞が続き、遮断不能しやすいと考えられる。

第13図は第9図(A)の結果と(10)式とから計算された電流零時の閉塞限界が、実測された遮断不能限界とほぼよく一致していることを示している。ただし電流は直流分がない場合で、回復電圧 600V (波高値)、再起電圧固有周波数を約 10 kc で実施した。極間距離を長くすると遮断限界も若干増加する傾向にあるが、その差は少ない。これらの結果から、交流零値の閉塞限界電流は(7)式で得られた閉塞限界瞬時値 I_m を実効値と考えたもの



第13図 閉塞限界と遮断不能限界

にほぼ等しいことがわかる。したがって、大電流遮断限界(実効値)はほぼ I_m に等しいといえることができる。

5. 結 言

空気遮断器の大電流遮断性能を限定するアークによるノズル閉塞現象について、理論的ならびに実験的に考察した。これらを要約すると、

- (1) 遮断部において発生するアークエネルギーと、それを持ち去る空気エネルギーとの間のエネルギー平衡条件とから、閉塞する限界の電流を計算すると(7)式が得られた。すなわち閉塞限界電流 I_m は $\frac{S}{L}$ に比例し (S : ノズル面積, L : ノズル上流側のアーク長), 比例係数は圧力、電極材料などに若干関係する。
- (2) 小電流ならびに大電流の実験結果はほぼ一致し、理論値とも大体一致しているを見てよい。
- (3) 電流零値まで閉塞が継続すると、再起電圧が低くても遮断不能となることがあり、その電流値は閉塞限界電流 I_m を実効値とみなしたものにほぼ等しい。

参 考 文 献

- (1) P. Baltensperger, P. Schmid: Bull. A. S. E. 47 333 (1956)
A. M. Cassie, F. O. Mason: C. I. G. R. E. No. 103 (1956)
- (2) 山崎: 電気試験所研究報告 第547号 (昭30-5)
- (3) 山崎: 日立評論 40, 1047 (昭33-9)
- (4) J. Labouret: C. I. G. R. E. No. 128 (1946)
- (5) 細包, 仲野, 山崎: 日立評論 39, 1381 (昭32-12)
- (6) 細包, 齋藤, 黒岡: 日立評論 40, 1039 (昭33-9)
- (7) 高砂: 昭32電気3学会連大 No. 358 (昭32-4)
高砂: 昭33電気学会東京支部大会 No. 146 (昭33-11)
高砂: 昭34電気4学会連大 No. 414 (昭34-4)
- (8) たとえば, 機械学会: 機械工学便覧第11編 99 (昭26)