軸方向強制対流を伴う安定化空気アークのエネルギー損失

正 員 松 村 年 郎 (名古屋大)

正 員 鬼 頭 幸 生 (名古屋大)

1. ま え が き

最近の電力用遮断器の主なもの、接触子の開極時、そこに発生するアークに空気や SF_6 ガスの気体を吹き付けてアークを消弧し、電流を遮断している⁽¹⁾。気体の吹き付けがアーク陽光柱から効果的にエネルギーを奪い、アークの消弧に対して極めて有効であることは定性的には疑う余地はないと思われるが、それを定量的に示した論文は少ない。この気体の吹き付けの有効性とその機構を基礎的かつ定量的に明確にすることが本論文の目的である。

このために、著者らは1気圧の空气中に直流で点弧する器壁安定化アークを取上げ、そこに軸方向の吹き付けのみを加えた場合について検討してきた⁽²⁾。器壁安定化アークを取上げた理由は次の2点にある。

(1) 静止気体中での器壁安定化アークにおいては、エネルギーは主に径方向の熱伝導によって失われると考えられ、アークの最も単純な形態とみなせ、その定常および過渡特性が理論的にも実験的にもかなり明らかになってきている⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。

(2) そこに軸方向の吹き付けを加えることにより、熱伝導損失に軸方向のみの気流による対流損失が加わったアークを実現でき、この対流によるエネルギー損失の影響を定量的に検討できる。

前報⁽²⁾において、このようなアーク陽光柱を対象として、一つの気流中アークモデルを提案した。このモデルの特徴は次の3点にある。

(1) 軸方向の気流がその方向にどのような累積作用を及ぼしながらアーク陽光柱各部からエネルギーを奪っているかというミクロな機構には立ち入らず、ア

ーク陽光柱全体からの強制対流によるエネルギー損失を考えている。

(2) それをアーク長で平均化し、そのエネルギーがアーク陽光柱単位長さの各部分から一様に失われていくという仮定を立て、強制対流損失の取扱いを簡単にしてみた。

(3) これにより計算機シミュレーションが容易となっている。

電界の強さ-電流特性という電気的特性の面から、このモデルの妥当性を検討した結果については、前報⁽²⁾で既に報告した。そこではアーク長数十 mm、アーク直径数 mm、空気吹き付け流量0~数十 l/min、アーク電流数十 A 以下の範囲において、計算機シミュレーション結果と実測結果とが良好一致を示しており、本アークモデルの妥当性が実証されている。

本論文においては、電気的特性から更に一步踏み込み、熱的特性としてアーク陽光柱内の温度分布を取上げ、この面からも本アークモデルの妥当性を検証する。その後、本アークモデルによるシミュレーション結果に基づいて、アーク陽光柱からのエネルギー損失に主眼を置き、それに対する熱伝導と強制対流の役割分担について検討する。その結果、陽光柱中心部分の導電性領域では熱伝導によるエネルギー損失が、陽光柱周囲の非導電性領域では対流によるエネルギー損失が支配的であるという従来の指摘⁽⁸⁾を定量的に検証できたので報告する。なお、検討対象は前述のように1気圧空气中の安定化直流アークであり、その他の条件も前報⁽²⁾と同様である。ただし、本論文ではアーク長50 mm、器壁半径2.5 mm の場合を例にとって示す。

2. 器壁安定化軸方向吹き付けアークモデルの概要⁽²⁾

ここでは、前報⁽²⁾で提案した気流中アークモデルの

Energy Loss in the Wall-Stabilized Arc Column with Forced Axial Air Flow. By Toshiro Matsumura, Member & Yukio Kito, Member (Faculty of Engineering, Nagoya University).
松村年郎: 正員, 名古屋大学工学部電気学科
鬼頭幸生: 正員, 名古屋大学工学部電気学科

概要を簡単に述べておく。すなわち、本論文においても、次の仮定および条件の下にアーク陽光柱からのエネルギー損失を算定し、計算機シミュレーションを行っている。

- (1) アーク陽光柱は軸対称である。
- (2) 室温 (300 K) の空気を陽光柱の軸方向に吹き付ける。
- (3) 吹き付けられた空気の軸方向速度 V_z は陽光柱内では次の径方向分布⁽⁹⁾を持つ。

$$V_z(r) = V_0 \left(\frac{R-r}{R} \right)^{1/7} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 r : 陽光柱中心から半径方向への距離、 R : 器壁半径(定数)、 V_0 : 陽光柱中心における流速(定数)

もちろん、実際には V_0 は軸方向 (z 方向) に変化するが、本アークモデルではその方向に平均化したものとして取扱っている。なお、 V_0 は同一吹き付け流量であっても、陽光柱内温度分布、従ってアーク電流によって変化する。具体的大きさは本アークモデルによるシミュレーション結果として得られ、本論文で取扱う流量 40 l/min 以下、アーク電流 30 A 以下ではたかだか音速の 1/4 程度であった。

- (4) 局所熱平衡を前提とし、放射によるエネルギー損失が無視できる電流領域⁽¹⁰⁾を対象とする。

- (5) 軸方向吹き付けのある器壁安定化アークの定常特性は、次のエネルギー保存式の解として与えられる。

$$\sigma E^2 + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \kappa \frac{dT}{dr} \right) - \rho \frac{V_z}{l} (h - h_{300}) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ : 導電率、 κ : 熱伝導率、 ρ : 質量密度、 h : エンタルピー、 h_{300} : 室温 (300 K) におけるエンタルピー、 E : 電界の強さ、 T : 温度、 l : アーク長

上式左辺第 1 項が電気的入力、第 2 項が熱伝導損失、第 3 項が強制対流損失である。この第 3 項が、前述のように軸方向の累積作用に立ち入らず、陽光柱全体の対流損失をアーク長で平均化し、その取扱いを簡単化したものである。

- (6) 本論文で取扱う流量をもたらず圧力差はたかだか 0.01 気圧程度であること、およびアーク装置を大気中に設置していることから、アーク陽光柱内はほとんど一様に 1 気圧とみなせる。よって、計算機シミュレーションにおいて、 σ 、 κ 、 ρ および h の温度依存性は文献(11)の 1 気圧のデータを用いている。

3. 強制対流による陽光柱内温度および導電領域の変化

〈3.1〉 陽光柱内温度分布 アーク長 50 mm、器壁半径 2.5 mm、アーク電流 20 A の安定化空気アークを例にとって、空気吹き付け流量を 0 (吹き付けなし) から 10, 20, 40 l/min と増加させた場合について、陽光柱内温度分布の変化の様子を図 1 に示す。ここで、実線は本気流中アークモデルによるシミュレーション結果で、 Δ 、 $\square$ 、 $\circ$ および ∇ 印は実測結果である。温度分布の実測は、著者らの研究室が開発した方法⁽¹²⁾ によった。すなわち、 N_2^+ 分子から放射されるバンドスペクトルのうち 391 nm に存在する帯頭を含む 19 本の密集した回転スペクトルを一括して測定し、温度を求めた。スペクトルの測定は正負両電極間のほぼ中央部のアーク陽光柱において行なった。なお本論文においては、吹き付け流量を室温 300 K における空気の体積流量で表わしている。

シミュレーション結果および実測結果ともに次のことが言える。

- (1) アーク電流を一定に保ったまま軸方向吹き付けを加えると、それによって陽光柱周辺の温度が低下する。
- (2) 逆に陽光柱中心部の温度が上昇する。

このように、実測結果とシミュレーション結果とは同じ傾向を示し、その大きさも良い一致を示している。従って、温度分布という熱的な側面からも本アーク

図 1 軸方向吹き付けによる器壁安定化空気アーク陽光柱内温度分布の変化 (アーク電流 20 A)

Fig. 1. Temperature profiles in the 5mm dia. and 50mm long wall-stabilized arc column with forced axial air flow (arc current = 20 A).

クモデルの妥当性が検証できた。

気体の吹き付けはアーク陽光柱の冷却を目的としている。しかし、陽光柱中心部分の温度はこの目的に反して上昇している。これは、陽光柱周辺部の温度低下により導電性領域が狭まり、吹き付けがないとき陽光柱全体に広く分布して流れていた電流が陽光柱中心部分に集中するようになり、そこでのジュール加熱が大きくなるからである。このように、アーク陽光柱周辺部分では吹き付けによる冷却効果は著しいが、陽光柱中心部では冷却効果は全くなく、逆に加熱効果が認められる。このことについては、エネルギー損失の面から第4章で詳しく論ずる。その前に、次節においてアーク陽光柱の導電性領域が強制対流によってどの程度縮小しているのかを、シミュレーション結果に基づいて検討しておく。

〈3・2〉 強制対流による導電性領域の縮小 1 気圧の空気の場合、約 5,000 K 以上でその導電率が顕著に大きくなる⁽¹¹⁾。そこで、本論文では $T=5,000$ K とする半径 $r_{5,000}$ をアーク陽光柱の導電半径とし、それ以内を導電性領域、それより外側を非導電性領域と呼ぶ。

図1に 5,000 K の温度レベルを一点鎖線で示した。それによれば、アーク電流 20 A の場合、吹き付けなしのとき $r_{5,000}=2.15$ mm だった導電半径が、10, 20, 40 l/min と吹き付けを強くするに従って、 $r_{5,000}=1.93, 1.76, 1.60$ mm と小さくなっている。

このような吹き付けによる導電半径の縮小を、アーク電流 30 A 以下の電流領域について調べた。図2は吹き付け流量をパラメータにとり、アーク電流による導電半径の変化を示している。吹き付けなしの場合についてみれば、この電流範囲では導電半径は電流が大きくなるに従って多少増大傾向にあるものの、ほぼ一

図2 軸方向吹き付けのある器壁安定化空気アーク陽光柱の導電半径

Fig. 2. Radius of the conduction area in the 5 mm dia. and 50 mm long wall-stabilized arc column with forced axial air flow.

図3 軸方向吹き付けによる器壁安定化空気アーク陽光柱の導電半径の縮小

Fig. 3. Decrease of the radius of the conduction area due to forced axial air flow in the 5 mm dia. and 50 mm long wall-stabilized arc.

定値を示している。吹き付けを加えてもこの傾向は変わらないまま導電半径が小さくなっている。次に、同一アーク電流のまま吹き付けを強くしていった場合、導電半径が吹き付けなしの場合に比べて何%に小さくなるかを図3に示す。同図では横軸に吹き付け流量、縦軸に導電半径を吹き付けなしの場合を100%として示している。同図のように、導電半径の変化はこの電流範囲ではほぼ一つの曲線で示される。吹き付け流量を10, 20 および 40 l/min と強くしていけば、導電半径はアーク電流によらず吹き付けなしの場合に比べてそれぞれ 90, 82 および 75% に小さくなることがわかった。

4. アーク陽光柱内におけるエネルギーの流れ

〈4・1〉 吹き付けによる全エネルギー損失の増加

軸方向に空気を吹き付けることによって、アーク陽光柱から外部へ奪われる全エネルギー損失がどの程度増加するかを図4に実線で示す。同図ではアーク電流

図4 軸方向吹き付けのある器壁安定化空気アーク陽光柱からのエネルギー損失

Fig. 4. Energy loss from the 5 mm dia. and 50 mm long wall-stabilized arc column with forced axial air flow.

をパラメータにとり、横軸を空気吹き付け流量、縦軸をアーク長 50 mm の陽光柱全体から毎秒運び去られるエネルギー（パワー）で示している。また、同図の破線および一点鎖線は、それぞれ軸方向吹き付けによるエネルギー損失分および径方向への熱伝導によるエネルギー損失分である。

一例として、同図の 20 A の場合について詳細に検討してみる。吹き付けなしの場合、陽光柱全体から毎秒 2.85 kJ のエネルギーが奪われている。吹き付け流量を 10, 20 および 40 l/min と強くしていけば、陽光柱全体から毎秒外部に通び去られるエネルギーは、それぞれ 3.5, 3.95 および 4.15 kJ と増大する。

次に、全エネルギー損失を吹き付けによって失われるエネルギーと径方向への熱伝導によって失われるエネルギーとに分けて考える。吹き付け流量を 0 から 10, 20 および 40 l/min と強くすれば、前者はそれぞれ 0 から 2.05, 3.15 および 4.0 kJ/s と増加し、後者は逆にそれぞれ 2.85 kJ/s から 1.45, 0.8 および 0.15 kJ/s と著しく減少している。このように、吹き付けを強くしたとき熱伝導によるエネルギー損失が小さくなるのは、図 1 の陽光柱内温度分布の変化からわかるように、器壁近傍における温度こう配が吹き付けることによって緩やかになるためである。

以上のことから、アーク陽光柱の軸方向に気体を吹き付けるとアーク陽光柱周辺部の温度が低下し、径方向への熱伝導によるエネルギー損失が小さくなるものの、強制対流によるエネルギー損失が著しく増加するので、全体としてのエネルギー損失は増大することが明らかとなった。

次に、全エネルギー損失の何%が軸方向吹き付けによってアーク陽光柱から外部へ奪い去られているのかを、アーク電流をパラメータにとって図 5 に示す。同図では、各アーク電流、各吹き付け流量において全エネルギー損失を 100% としており、実線の下の方が吹き付けによるエネルギー損失分、上の部分が熱伝導によるエネルギー損失分を表わしている。当然、吹き付けのない場合（吹き付け流量 0 l/min のとき）はすべて熱伝導によるエネルギー損失であり、吹き付けによるエネルギー損失分は 0% である。

図 5 において、三つの曲線はほとんど重なっており、全エネルギー損失に占める吹き付けによるエネルギー損失の割合は、同一吹き付け流量でみればアーク電流によらずほぼ一定であると言える。また、その割合は 10 l/min の吹き付けで約 60% と半分以上であり、更に 20 および 40 l/min と吹き付け流量を大きくする

図 5 器壁安定化空気アークの全エネルギー損失に占める強制対流によるエネルギー損失の割合

Fig. 5. Ratios of the forced axial convection loss to the total energy loss from the 5 mm dia. and 50 mm long wall-stabilized arc column.

と、それぞれ約 80 および 96% と大きくなる。このように 40 l/min 以上の吹き付けでは、ほとんど軸方向の気流によってエネルギーが陽光柱から外部に運び去られており、軸方向の吹き付けがアーク陽光柱のエネルギーを奪い去るのに有効な手段であると言える。

〈4・2〉 アーク陽光柱内のエネルギー密度分布

前節において、アーク陽光柱全体から毎秒失われるエネルギーを、陽光柱外部から見た場合について論じた。本節では更に一步踏み込み、陽光柱内部のエネルギーの流れを詳しく検討する。例として、アーク長 50 mm、器壁半径 2.5 mm、アーク電流 20 A、空気吹き付け流量 40 l/min のアークを取上げる。

図 6 にアーク陽光柱内のパワー密度（単位時間、単位体積あたりのエネルギー）の径方向分布を示す。同図において、実線が電気的入力分、破線が軸方向吹き付けによるエネルギー損失分、一点鎖線が径方向への熱伝導によるエネルギー損失分である。また、各パワー密度はアーク陽光柱各部に対して入力として作用している場合を正、損失として作用している場合を負で表わしている。

図 6 から次のことが言える。

(1) 電気的入力（曲線 A）は半径 1.6 mm 以内の陽光柱中心部分のみに存在し、そこにのみ電流が流れていることを示している。このことは、〈3・2〉節において吹き付け流量 40 l/min のとき導電半径が 1.6 mm であったことと一致している。すなわち、〈3・2〉節で 5,000 K 以上の温度領域の空間を導電性領域とみなしたことが妥当であったと言える。

(2) 軸方向吹き付けによるエネルギー損失密度（曲線 B）は、陽光柱全体にわたってほぼ一様に分布している。

アーク電流 20 A, 空気吹き付け流量 40 l/min

図 6 軸方向吹き付けのある器壁安定化空気アーク
陽光柱内におけるパワー密度の径方向分布

Fig. 6. Power density profiles in the 5 mm dia. and 50 mm long wall-stabilized arc column with forced axial air flow.

(3) これに対し、熱伝導によるエネルギー損失密度(曲線 C)は、陽光柱中心部分に集中しており、半径 0.9 mm より外側の陽光柱周辺部では逆に入力として作用している。これは、アーク周辺部分ではそこから熱伝導によって流出するエネルギーが陽光柱中心部から熱伝導によって流入してくるエネルギーより小さいことを意味している。そして、その差の分と電気的入力(ただし、半径 1.6 mm より外側の非導電性領域ではこの項は 0 である)との合計が吹き付けによってアーク陽光柱の外部へと運び去られている。

図 6 のパワー密度分布からは、吹き付けによるエネルギー損失はあまり多くないような印象を与えられる。しかしアーク陽光柱は軸対称であるので、同じパワー密度の占める空間は周辺部にいくほど広がる。従って、アーク陽光柱内のエネルギーの量を考える場合、その影響を考慮に入れておく必要がある。そこで、エネルギーの量が一見してわかるように、円筒座標 (r, θ, z 座標) における θ および z 方向の空間の広がり ($2\pi r$ および アーク長 l) をパワー密度に掛けた量、パワー密度 $\times 2\pi r l$ を縦軸にとって、その径方向分布を図 7 に示しておく。同図の各曲線は図 6 のものとそれぞれ対応しており、入力を正、損失を負で表わしていることも同様である。

図 7 の各曲線を半径 r で積分した量(各曲線と横軸とで囲まれる図形の面積で、横軸より上の部分を正、下の部分を負と考える)がアーク陽光柱全体の電気的

アーク電流 20 A, 空気吹き付け流量 40 l/min

図 7 軸方向吹き付けのある器壁安定化空気アーク
陽光柱内におけるエネルギーの流れ

Fig. 7. Energy flow in the 5 mm dia. and 50 mm long wall-stabilized arc column with forced axial air flow.

入力および毎秒あたりのエネルギー損失である。熱伝導によるエネルギー損失に関して言えば、前述のように陽光柱中心部では損失、周辺部では入力として作用しているので、アーク陽光柱の外から見た場合、両者が相殺され、熱伝導によってエネルギーがほとんど外へ出てこないことになる。しかし、熱伝導によるエネルギーの流れがないわけではなく、陽光柱内部においては熱伝導はエネルギーの流れに対して重要な役割を演じている。

次に、吹き付けによるエネルギー損失に関して言えば、その大半がアーク陽光柱周辺部の非導電性領域に存在していると言える。

以上、本章における考察から、軸方向強制対流のある安定化アーク陽光柱内のエネルギーの流れに関して、次のメカニズムが定量的に明らかとなった。陽光柱は中心部の導電性領域と周辺部の非導電性領域とに大まかに分けられる。導電性領域において、そこで生じている電気的入力は主に熱伝導によってとりえず非導電性領域に運ばれる。そして、そのエネルギーは軸方向吹き付けによって最終的に陽光柱の外部へと運び去られる。

5. 結 論

1 気圧の空气中に直流で点弧する器壁安定化アークに軸方向の吹き付けを加えた場合を対象として、著者が前報⁽²⁾で提案したアークモデルに基づいて、アー

ク陽光柱内のエネルギーの流れについて検討した。アーク長 50 mm, 器壁半径 2.5 mm のアークを例にとって考察したところ, 次のことが明らかとなった。

(1) 同一アーク電流のまま空気吹き付けを強くしておけば, 陽光柱周辺部の温度は低下するが, 中心部の温度は逆に上昇する。

(2) このことは実験的にも確認され, 本アークモデルの妥当性がこの面からも実証できた。

(3) 吹き付けによりアーク陽光柱導電性領域は狭まり, 電流は中心部に集中するようになる。

(4) 同一電流のまま吹き付けを強くすれば, 陽光柱全体からの全エネルギー損失は増加する。

(5) 陽光柱を外側から見た場合, 吹き付けを強くしていけば全エネルギー損失の大部分が強制対流によって失われているように見える (40 l/min の吹き付け流量において, 全エネルギー損失の 96% が吹き付けによるもので, 残りの 4% が熱伝導によるものである)。

(6) しかし, 電気的入力のおほとんどが吹き付けによって陽光柱外部へ直接運び去られるのではない。

(7) 陽光柱内部を詳細に見れば, 陽光柱中心部の導電性領域では, 熱伝導によるエネルギー損失が周辺部の非導電性領域では軸方向吹き付けによるエネルギー損失が主流を占めているという従来の指摘⁽⁸⁾が定量的に確認できた。

(8) アーク陽光柱中心部で発生したエネルギーは, 主に熱伝導によって陽光柱周辺部の非導電性領域にいったん運ばれる。そして, 最終的にそのエネルギーは, 軸方向の吹き付けによって陽光柱の外側へと運び去られる。

以上のように, 陽光柱内のエネルギーを外側へ運び

去るために, 軸方向の吹き付けは有効な手段であると言える。

最後に, 本研究は昭和 58 年度文部省科学研究費(奨励研究 A) の補助を受けたこと, また計算機シミュレーションおよび実験データの処理は名古屋大学プラズマ研究所電子計算機センターおよび同大学大型計算機センターを利用したことを付記し, 感謝の意を表す。

(昭和 59 年 9 月 25 日受付)

文 献

- (1) 電気学会通信教育会: 電力用スイッチング断器, p. 154 (昭 57) オーム社
- (2) 松村・鬼頭: 「軸方向強制対流を伴う安定化定常空気アークモデル」, 電学論 A, 104, 241 (昭 59-5)
- (3) 鬼頭・宮地・足立: 「器壁安定化空気アーク陽光柱の電界の強さ」, 同上 A, 96, 280 (昭 51-6)
- (4) 松村・榊原・鬼頭・宮地: 「電流しょう乱を与えられた器壁安定化空気アークのコンダクタンス時定数」, 同上 A, 97, 513 (昭 52-10)
- (5) 松村・鬼頭・宮地: 「過渡空気アーク時定数の器壁断面積および中心温度依存性」, 同上 A, 99, 503 (昭 54-11)
- (6) 松村・鬼頭・宮地: 「交流電流で点弧する安定化空気アークモデルの提案」, 同上 A, 100, 379 (昭 55-7)
- (7) T. Matsumura, T. Sakakibara, Y. Kito & I. Miyachi: "Responses of a wall-stabilized air arc to step and sinusoidal change in current", *IEEE Trans. Plasma Science*, PS-8, 248 (1980)
- (8) H. Edels: "Properties and theory of the electric arc", *Proc. IEE, Part A*, 108, 55 (1961)
- (9) 甲藤: 伝熱概論, p. 102 (昭 51) 養賢堂
- (10) Y. Kito, I. Miyachi & T. Sakakibara: "Influence of radiation loss on the stabilized air arc characteristics", *Proc. 4th Int. Conf. on Gas Discharges*, IEE. Conf. Pub., No. 143, 1 (1976)
- (11) 作田・鬼頭・宮地: 「銅蒸気が混入した高温空気アークの導電率, 熱伝導率およびエンタルピー」, 電学論 A, 101, 241 (昭 56-4)
- (12) T. Sakuta, Y. Kito & I. Miyachi: "Estimation of high temperature in air arc by integrated measurement of emission coefficients on concentrated band spectrum radiated from N molecules", *IEEE Trans. Plasma Science*, PS-8, 29 (1980)