大気中銅アーク水平陽光柱上部に生じる アーク炎の分光学的研究

中 桶 悟 光・三 輪 宜 弘

静岡大学工学部応用物理学教室 干432 浜松市城北 3-5-1

(1994 年 2 月 14 日受理)

Spectroscopic Study of an Arc Flame over the Horizontal Copper Arc Column in Air

Norimitsu NAKAOKE and Yoshihiro MIWA

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Shizuoka
University 3-5-1, Jyohoku, Hamamatsu 432

(Received February 14, 1994)

Synopsis

The band spectra of CuO, CuH and OH molecules are observed in the surrounding gas around the copper arc column when the measuring time is increased by about 10^4 times compared with the time which is needed in measuring the vapor spectra of the copper arc column. As the CuH band spectra shows very open rotational structure, the temperature of the surrounding gas is determined by the intensity distribution method from the rotational spectra in the CuH 4280Å system band. The temperature obtained is about 3000 K.

It was tried to make the large flame of the surrounding gas for the aggressive utilization and the large flame with about 8 cm in length was obtained by varying the horizontal gap length at the arc current of D. C. 10A.

1. 緒 言

銅アーク放電の陽光柱は銅スペクトルを発光し、2 線強度比法や強度分布法 (ボルツマン・プロット法) で気体温度が測定できる^{1,2)}。それに対しアーク周辺の銅スペクトルの発光のない領域の温度はシュリーレン応用法や光干渉法で求められる。その他、CARS 法で室温から 2000 K までの温度が測定されている³⁾。また、大気中銀接点アークの可視部全スペクトルの時間的、空間的ふるまいを詳しく調べる研究もなされている⁴⁾。

本研究の目的の第一は、銅アーク周辺の金属線スペクトルの発光のない領域に強度の弱い分子スペクトルの発光がある事に着目して気体温度の測定ができるか否かを調べる事にある。究極的には陽光柱の温度から室温に至るまでの温度分布を連続的に測定してアークに関する全ての知見を得る事を目的とする。目的の第二は、分子スペクトルの弱い発光の測定を容易にするため、また熱源等を利用しやすくするためアークを水平に点弧し、アーク周辺気体が陽光柱の上部にできるようにして分子スペクトルの発光領域を大きくする事にある。水平アーク陽

光柱の上部にでき、分子スペクトルの発光を伴う気体はローソクの炎のようであり、アーク炎と呼ばれる。このアーク炎はアーク電流 10 A の時アーク長を変える事により 5 cm 以上の長いものも容易に得られ、電源と電極があれば特別な燃料を必要としない高温の熱源として応用できる。また、アーク陽光柱を包むアーク炎は、更に銅や酸化銅の赤熱微粒子の赤いカーテン状の層に包まれているのが見られ、放射温度計を用いて、その層の温度測定を試みた。また、アーク炎におけるスペクトルの空間分布と時間的变化を見るため、分光像写真のビデオ撮影を試みた。また、大雑把ではあるが、測定されたアーク炎の温度をチェックするため、モリブデン・ワイヤーとタングステン・ワイヤーの溶融試験を試みた。

2. 理 論

2.1 分子スペクトル発光強度

分子スペクトルはバンドを形成し、一般的に密集しているもので高い分解能の分光器でないと回転スペクトル線を分離できない。しかし、CuH の分子の回転スペクトル (Band head 4280 Å) は構造が簡単で容易に分離でき、その強度分布を測定することにより回転温度が求まり、気体温度を推定できる。

今、全角運動量の量子数 A 、振動量子数 v 、回転量子数 J を持つエネルギー単位から各々の量子数が A' , v' , J' である下のエネルギー単位に遷移する時に放出されるスペクトル強度は、特に回転量子数の変化のみに注目すると、次式の $I_{JJ'}$ で与えられる。

$$I_{JJ'} = C_{em} \cdot \nu_{JJ'}^4 \cdot N_J \cdot S_{JJ'} / (2J+1) \quad (1)$$

ここに、 C_{em} は振動量子数を含んだ電子遷移に関する定数、 $\nu_{JJ'}$ は回転スペクトル線の波数、 N_J は回転量子数 J を持つ分子数密度、 $S_{JJ'}$ は回転量子数の遷移に関する定数のヘンル・ロンドン因子である。

$\Sigma \rightarrow \Sigma$ 遷移 ($A, A'=0$) に対するヘンル・ロンドン因子は P 枝、R 枝に関し次式で与えられる⁵⁾。

$$S_{JJ'} = (J+J'+1)/2 \quad (2)$$

ただし、 $J=J'+1$ (P 枝)、 $J=J'-1$ (R 枝)

式 (1) の右辺の N_J 以外の因子、 $\nu_{JJ'}^4$, $S_{JJ'}/(2J+1)$ は回転量子数 J に対する依存性はゆるやかであるとして無視すると分子スペクトルの強度は N_J に比例すると考えられる。

熱平衡状態では、振動量子数 v を持つ単位にあって回転量子数 J を持つ分子数密度は次式で与えられる。

$$N_J = (N/Q_r) (2J+1) \exp[-B_v J(J+1)hc/kT] \quad (3)$$

ここに、 N は全分子数密度、 Q_r は温度の関数で回転運動の分配関数、 B_v は振動量子数 v を持つ分子の回転

定数、 h はプランク定数、 c は光速、 k はボルツマン定数である。 T は分子の回転温度であり、気体温度を反映している。

2.2 強度分布法による回転温度

式 (1) に式 (3) を代入して得られる式の自然対数をとる事により、次式を得る。

$$\log\{I_{JJ'}/(\nu_{JJ'}^4 \cdot S_{JJ'})\} = \log(C_{em} \cdot N/Q_r) - B_v J(J+1)hc/kT \quad (4)$$

各回転スペクトル線の強度 $I_{JJ'}$ を測定し、 $I_{JJ'}/(\nu_{JJ'}^4 \cdot S_{JJ'})$ を計算する。この量の自然対数を J 準位の回転エネルギーに比例する $B_v J(J+1)$ に対してグラフにプロット (ボルツマン・プロット) する。もし直線が得られれば、直線の勾配の逆数から回転温度 T を求める事ができる。自然対数を常用対数に直すには (4) 式の両辺に $\log_{10} e$ を乗ずればよい。

振動量子数 v を持つ分子の回転定数 B_v は次式で与えられる。

$$B_v = B_e - \alpha_e(v+1/2) \quad (5)$$

ここに、 B_e は平衡状態における回転定数、 α_e は振動量子数 v に依存しない定数である。CuH 分子に関する、それらの定数は文献 (6) より得られる。

ボルツマン定数、プランク定数や光速の基本的な物理定数は各種物理定数表より得られる。

3. 実 験

光検出器の測定時間を大きくすると、銅スペクトルの発光がない銅アーク陽光柱周辺の気体中で強度の弱い分子スペクトルが観測にかかり、発光していることが判る。その弱いスペクトルの測定をするには、測定時間を大きくする他、高感度の光検出器を用いるか、発光領域を大きくするとよい。ここでは、発光領域を大きくする事も考え、アークを水平に点弧し、周辺気体が対流により上方にできる性質を利用し、アーク電流やアーク長を変えてみた。すると、試料として選んだ銅、銀、鉄、カーボン電極のうちで、銅電極を用いた時のみ比較的安定で上方に長いローソクの炎の様な形をした特徴ある陽光柱周辺気体得られた。それをアーク炎と呼ぶ。このアーク炎について、色々な実験を行った。

3.1 アーク炎の静止写真

10 mm 径の銅電極を水平に配置し、アーク電流として直流 10 アンペアを流し、間隙長を 6 mm にした時に得られたアーク炎の静止写真を図 1 に示す。(a) 図は陽光柱の強い光をかくすために電極間隙をしゃへいしたものである。陽光柱はアーク炎を明るく写すと、その明るさにかくれて見えないが、露光時間を絞るか、または露光

Fig. 1 The photographs of a copper arc flame over the horizontal arc column. The arc column and the gap of the electrodes can not be seen because the light from the arc column is shielded in (a), so they are shown by illustration in (b). The diameter and the gap length of the electrodes are 10 mm and 6 mm, respectively.

時間を更に長くして写真濃度を反転させると観測でき、それをイラストで (b) 図に示す。陽光柱の直径は約 3 mm である。アーク炎の形はローソクの炎の様であり、間隙長を変える事により 5 cm 以上の長さの炎が容易に

得られる。電極間隙が狭いとアーク炎は見えなくなる。

3.2 アーク炎の座標軸設定

アーク陽光柱中央部に座標原点をとり、上方に z 軸、アーク軸方向右側に y 軸、視線方向手前向きに x 軸を設定する (図 1 参照)。図 1 に見られるアーク炎の中央 (y 座標はゼロ) を分光器の垂直入射スリットに結像して写真を撮ると、アーク炎の視線方向に積分された分光強度の z 軸方向の分布が測定できる。アーク像を 90 度回転させて入射スリットに結像させると、視線方向に積分された分光強度の y 軸方向の分布が測定でき、軸対称性があればアーベル逆変換^{1,2)}でアーク炎の分光強度の径方向分布を求めることができる。

3.3 アーク炎の分光写真

図 1 に見られるアーク炎の中央を光学系を用いて分光器の垂直入射スリットに結像して波長 2000-7000 Å の分光写真をとると、陽光柱に NO, CN 分子スペクトル、アーク炎に CuO, CuH, OH 分子スペクトルが観測される。その中で CuH 分子スペクトルは回転スペクトルの構造が簡単であり回転線の分離が容易である。視線方向に積分された CuH 分子スペクトルの分光強度の z 軸方向分布の濃度を示す分光写真の 1 例を図 2 に示す。アーク炎は 5 cm 以上の長いものが得られるが、分光器の入射スリットの長さ 10 mm に等倍率で結像させるため、同図ではアーク炎が 5 mm 程度の短いものを示してある。分光器は島津製作所 GE-100 形で、回折格子は 1200 本/mm のものを用いた。写真フィルムは Fuji.

Fig. 2 The photograph of the (0-0) band spectra in the 4280 Å system and the 4275 Å copper line spectrum taken in the copper arc flame. The density of this photograph gives the z -axial spectral intensity distributions.

Neopan 400 で露光時間はカメラシャッターを用いて 10 秒にした。露光時間をそれより短くすると CuO や CuH 分子のスペクトルが観測できなくなる。その間、アーク炎は安定していた。同じ測定器で陽光柱の金属スペクトルを観測するには 1 ms の露光時間ですみ、それに比べるとこの場合には 1 万倍の時間が必要である。

3.4 アーク炎の回転温度

得られた分光写真 (図 2) の濃度はマイクロフォトメーターを用いて求められ、この分光写真を得る場合と同じ条件 (濃度, 露光時間, 同時現象) で得られた N. B. S. 規格の標準電球の分光写真の濃度と比較して、回転スペクトルの分光強度を求める。写真濃度から分光強度を求める手順の詳細は文献 (1), (2) に記されている。

3.4.1 強度分布法による回転温度

測定に用いられる CuH 分子スペクトル (Band head 4280 Å) の電子遷移は 4280 Å システムと呼ばれ、上下準位の振動量子数は共にゼロのため (0-0) バンドと呼ばれる。測定で得られた、その分子スペクトルの各回転線 (P 枝) の強度に対して (4) 式の左辺の値を求め、これを波数単位で示された回転上準位のエネルギーに対

してプロット (ボルツマン・プロット) したものを図 3 に示す。得られたプロットは大体直線を示し、アーク炎は熱平衡にあるものと見なされる。最小 2 乗法で直線の勾配を求め、その勾配の逆数から (4) 式を用いて回転温度を求める。同図の例においてはアーク炎の温度は 2610 K である。測定値が直線から外れる原因は熱平衡からのずれの他、自己吸収や色々な補正不足等により注意を要する。分子スペクトルから気体温度を求める際の注意事項は文献 (7) に詳細に記されている。

3.4.2 アーク炎の温度の z 分布

アーク炎の温度の z 分布を測定したところ、測定した領域 ($z=0-6$ mm) での温度は 3100 K から 2500 K に、上方に行くにつれ単調減少した。その様子を図 4 に示す。測定値は 5 回の測定値の平均値であり、約 200 K の誤差を持つ。同図にはアーク炎の短い場合のものと、やや長い場合のものを示す。陽光柱に接触する位置の温度を外挿で求めると 3600 K であり、誤差を考慮すると、銅スペクトルを用いて測定した陽光柱端の温度 3600 K²⁾ ないし 3900 K¹⁾ とほぼ等しい。上方に行くと温度が低下して室温に近づく。アーク炎の写真を x 方向

Fig. 3 The relations of the rotation spectral intensity in the CuH 4280 Å system (0-0) band to the energy of the upper level of the transition. The energy is given in unit of wave number. These rotation spectra are P-branch and their intensities are reduced.

Fig. 4 The z -axial temperature distributions of the arc flame. The vertical dotted line indicates the arc column edge.

Fig. 5 The z-axial spectral intensity distributions of the Cu 4275 A, CuO 6146 A band head and P(12)-branch of the rotation spectra in the CuH 4280 A system (0-0) band.

とY方向から撮影したところ、陽光柱端の近傍で軸対称性が無いと思われたのでアーベル逆変換を用いた温度の径分布の測定はできなかった。

3.5 銅スペクトル, CuH, CuO 分子スペクトル強度のz分布

図1に見られるアーク炎の中央において、視線方向に積分された銅スペクトル強度のz方向分布を図5に示す。

波長 4275 A の銅スペクトルは陽光柱の端で強度が急減し、その後アーク炎上方にかけて大略一定の割合で強度は減少する。そのスペクトルは発光ではなく、アーク炎における微粒子等によるアーク陽光柱からの光が散乱されたものと推測される。それは水銀ランプのスペクトルを外部から照射した場合にアーク炎から銅スペクトルの場合と同様の水銀スペクトル (z 方向分布) が観測されるからである。図5には、CuH バンドスペクトル (Band head 4280 A) における回転スペクトル P (12) 枝の強度変化も示す。そのz分布はゆるやかに減少し、図4に示した例ではzが6mmで急減している。それに対し、CuO 分子の Band head 6147 A の分光強度はzが7mmまで観測されるので、zが7mmまで気体温度が測定できる可能性がある。しかし、回転スペクトルが密集して分離が困難であり、温度を測定するには回転スペクトルが分離される場合とは別の方法が必要である。強度を比較すると、Cu 4275 A より CuH バンド

Fig. 6 The spectral-image photograph of the copper horizontal arc column and the arc flame taken by the video camera and printed out by the video printer. The arc current and the gap length are D. C. 10 A and 6 mm, respectively.

スペクトル (Band head 4280 A) の各回転スペクトルの強度は更に1桁程度小さい事が分かる。

3.6 分光像写真のビデオ撮影

非点収差のない分光器の入口スリットの幅を広げ、その内部にアーク像を結像すると写真乾板面に分光像が観測できる。そこにスリガラスを置き、適当な距離からビデオ撮影する事により、スペクトルの空間分布を示す分光像の時間的変化を観測できる。その1例を図6に示す。アークは図1に示したものとと同じく、水平配置の銅電極に直流10アンペアを流し電極間隙を6mmにしたものである。Cu 4651 A の分光像やその右側に見られる分光像は分光強度が弱く陽光柱の形のみが写っている。水平に点弧された陽光柱が上方にやや湾曲しているのが見られる。Cu 5105 A や 5218 A の分光像はアーク炎の分光強度も強いいためアーク炎と陽光柱の両者ともに明るく見え、区別が明確でない。CuO 分子の波長 6147 A 近辺の分光像は分子のバンド・スペクトルのために多くの分光像が左右にずれて重なっている。そのために明確な分光像は見られない。しかし、陽光柱における強い発光は無くアーク炎においてのみ発光している事が分かる。また、この分子スペクトルはアーク炎のみならず、陽光柱の周辺の前後左右や下方にも見られる。アーク炎は数秒ないし数10秒安定している。

3.7 モリブデンワイヤーの溶融実験

陽光柱端のやや上方のアーク炎にモリブデンワイヤーを挿入して、先端部分が溶融するか否かを調べた。その写真を図7に示す。ワイヤーの左先端が溶融している様子が見られる。融点 2890 K の1mm径のモリブデン

Fig. 7 The photograph of the molybdenum wire tip melted in the arc flame. The diameter of the wire is 1 mm.

ワイヤーは溶融する事が分かった。しかし、融点 3650 K の 1 mm 径のタングステンワイヤーは溶融しなかった。従って、測定した位置でアーク炎の温度は 2890 K 以上、3650 K 以下であると考えられる。

3.8 放射温度計による溶融赤熱微粒子の温度測定

銅アーク陽光柱はアーク炎に包まれ、アーク炎は、更に銅や酸化銅の溶融赤熱微粒子の赤いカーテン状の層に包まれているのが見られる。この溶融赤熱微粒子は上方に行くと冷えて暗赤色になり、更に冷えて白い煙となる。

この赤い微粒子層の温度を、ミノルタ放射温度計 (TR-630 A) で測定した。その方法はアーク炎の上方で煙を金属板に付着させ、それを集めてパーナーで加熱し赤熱化させ放射温度計で温度を測定するものである。得られた温度は、放射率を 1 と仮定して、電極や陽光柱の近くでオレンジ色に明るく輝く所 (図 1 参照) で約 1470 K である。当然の事であるが上方に行くにつれて冷やされ約 770 K の暗赤色になり、更に冷えて白い煙になった。放射率を 0.5 と仮定すると、温度は 70 K 高い数値になった。そのため、上記の測定値は 100 K 程度の誤差を持つ。今後は、赤熱微粒子の連続スペクトルの分光像を撮影する方法を考案し、詳細な赤熱微粒子温度の空間分布を測定する予定である。

4. 議 論

4.1 アーク陽光柱周辺の気体温度

銅スペクトルを用いて求められた大気中 5 ないし 10 アンペア程度の銅アーク陽光柱端の温度は 3600 K²⁾ ないし 3900 K¹⁾ 程度である。しかし、陽光柱端における分光強度は弱く、2 線強度比法による温度の測定精度が落ちることから、陽光柱端の位置や温度を明確にする事は困難である。また、陽光柱端の定義も曖昧であるが、ここでは金属スペクトルの放射があるかないかの境界または金属スペクトルの急減する所を考えている。図 2 を見

ると、多くの銅スペクトルの強度が分子スペクトルの強度に比べて桁違いに強いので、写真濃度が同じ z 軸の位置で飽和し、その飽和現象から陽光柱端がかなり明確に見られる。アーク陽光柱に接触している周辺気体の温度は、アーク電流によるエネルギーの注入がないため陽光柱端の温度より低くなる筈である。CuH 分子スペクトル (Band head 4280 Å) における回転スペクトルの強度分布法より求めたアーク炎の温度は約 2500 K から 3100 K であり、妥当な値と思われる。外挿で求めた陽光柱端における温度は 3600 K で、銅スペクトルの線強度比法で求めた陽光柱端の温度 3600 K²⁾ ないし 3900 K¹⁾ とほぼ等しい。温度の測定誤差や陽光柱端の曖昧さを考えれば、つじつまの合う結果である。以上の結果より、2500 K 以下の温度が連続的に測定できれば、目的とするアーク陽光柱の温度から室温にかけての温度分布が完全に連続的に測定できる。

CuH 分子スペクトルの発光の見られない温度 2500 K 以下の低温部にかけて、CuO 分子の発光が見られる領域があるので、CuO 分子スペクトルから温度を求める可能性があるが、回転スペクトルの分離が容易でないため、今後の課題としたい。また、アーク雰囲気になんらかの水素を混入させ CuH 分子の密度を上げれば、CuH 分子スペクトルの観測できる領域が増して温度測定の出来る領域が増えると思われるが、それも今後の課題としたい。

その他、観測された OH 分子スペクトルでアーク炎の温度を測定することも可能であるが³⁾、CuH 分子スペクトルを用いた時に比べて狭い領域の温度測定しかできないことが分かったので省略した。

4.2 アーク陽光柱周辺の銅スペクトル

アーク陽光柱端で銅スペクトルの強度は急減してゼロに近づく。しかし、測定時間を 1 万倍程度大きくすると、イーク陽光柱の周辺気体にも銅スペクトルが観測される。このスペクトルは発光によるものではなく、アーク陽光柱から放射された銅スペクトルが周辺気体中にある微粒子等により散乱されたものである。それを裏付けるために、水銀ランプのスペクトルを照射して周辺気体による散乱光を測定したところ、銅スペクトルと同様の振舞いをする事が確認された。

4.3 分子スペクトルの観測

この実験では、アーク陽光柱の銅スペクトルを観測する時間に比べて観測時間を 4 桁以上大きくし、かつ大きなアーク炎を作る事により、強度の弱い CuH 分子スペクトルの観測に成功したといえる。

従って、上記の考察より観測時間を 4 桁から 5 桁大き

く取れば、各種大気中アーク放電において、普通は観測できないと思われる分子スペクトルが観測される可能性が生まれる。

4.4 アーク炎の大きさと水平アークの意義

アーク陽光柱を水平に点弧すると周辺気体は上方にローソクの炎のような形になり、アーク炎と呼ばれる。そのアーク炎を積極的に利用するには、その大きさをコントロールできるようにする必要がある。アーク電流を5アンペアに保ち、アーク長を変えてアーク炎の大きさを調べてみると最大5cm、アーク電流10アンペアの時には最大8cmのものができることが分かった。

アークを垂直に点弧すると、アーク周辺の高温気体は上方に行くに従って広がる。しかし、上方には電極があるため、それに邪魔されてアーク炎の観測も邪魔され、分子スペクトルの観測が困難になる。その点を考えても、アークを水平に点弧する意味がある。

4.5 分光像写真

アーク像の分光像を分光写真器で写す時、相隣るスペクトルの像が離れていれば分光像の撮影が可能であるが、相隣るスペクトルの像が近接して重なると明確な分光像の撮影ができない。その時は一度分散した分光像のうち必要な波長の分光像を集光して重ねると、バンド・スペクトルや連続スペクトルの分光像を得る事ができる⁹⁾。

この論文で撮影した分光像を見ると、各スペクトルの強度の空間分布により、陽光柱のみが写るもの、陽光柱とアーク炎が写るもの、像が重なり合っているがアーク炎のみが写るものに分かれている事がわかる。

時間的に、それらの分光像は数10秒の程度で安定し、陰極点や陽極点が動く時と気流が動く時に変動するのが見られる。アークの分光像はアークが安定している時間内に撮影するので像のボケは見られない。アーク炎は陽光柱より相当大きいので、陽光柱の微少な変動の影響は受け難く、その分安定であるといえる。

5. ま と め

大気中銅アーク陽光柱周辺気体の銅スペクトルの発光のない領域の温度を測定するため、CuH分子スペクトルの微弱な発光の測定を試みた。分子スペクトルの観測を容易にするため、また熱源として利用するためにアークを水平に点弧し、アーク陽光柱の上方に大きな周辺気体を発生させた。その形から、それをアーク炎と呼ぶ。そのアーク炎に関し、次の事が判明した。

1) 銅アーク陽光柱の銅スペクトルを写真観測する露光時間に比べ、1万倍程度以上の露光時間をかけるとア

ーク炎のCuH分子スペクトルが観測できる。

2) CuH分子回転スペクトルの強度分布法で測定したアーク炎の回転温度は2500Kから3100Kでありアーク炎の上方にいくにつれ温度が低下する。外挿で求めた陽光柱端の温度は約3600Kである。

3) アーク炎の陽光柱端やや上方で融点2890Kの1mm径のモリブデン棒を溶融できるが、融点3650Kの1mm径のタングステンは溶融できない。その事からアーク炎の温度は2890K以上、3650K以下である。分子スペクトルから測定された温度は3000K前後であり、モリブデン融点とタングステン融点の間にある。

4) アーク炎はアーク電流10アンペアの時アーク長を変えることにより、長さ5cm以上の大きなものが容易に得られる。

5) アーク陽光柱ではNOやCN分子スペクトルが観測できるのに対し、周辺気体のアーク炎ではCuO, CuH, OH分子スペクトルが観測できる。

6) アーク炎には、アーク陽光柱で放射される銅スペクトルのアーク炎中の微粒子による散乱光が観測されるが、陽光柱端の強度に比べて桁違いに分光強度が弱い。CuH分子スペクトルは更に銅スペクトルの散乱光より1桁程度分光強度が弱く、測定するには、その分、余分に大きな測定時間ないし感度の増強が必要である。

7) 陽光柱はアーク炎に包まれ、更にアーク炎は銅や酸化銅の赤熱微粒子の赤いカーテン状の層に包まれている。明るい所の温度は約1470Kである。

8) 露光時間を大きくすると、写真濃度が飽和する事から陽光柱端を明瞭に見る事ができる。

9) 試みた銅、カーボン、銀、鉄電極アークの中で、カーボン電極アークにはアーク炎が明瞭には見られなかった。赤熱微粒子層は銅電極アークと鉄電極アークに見られたが、カーボン電極アークと銀電極アークには見られなかった。比較的安定なアーク炎は、銅電極アークにおいてのみ見られる。

参考文献

- 1) 中桶悟光: 分光研究, **27**, 286 (1978).
- 2) 中桶悟光: 分光研究, **33**, 21 (1984).
- 3) 榊原建樹, 古野志健男, 菊池 宏, 英 貢, 井上とくた, 井口 哲: 電気学会論文誌 A, **101**, 642 (1981).
- 4) 窪野隆能, 山本昇志, 中桶悟光: 電子情報通信学会論文誌 C-II, **J75-C-II**, 8 (1992).
- 5) W. A. ビンゲル (佐藤博保訳): 分子の構造とスペクトル (培風館, 昭和48年) 第6章.
- 6) Herzberg: *Spectra of diatomic Molecules*, 2nd

- ed. (D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1950) p. 526.
- 7) 有安富雄, 高井正弘: 電気学会誌 **87-1**, 149 (1967).
- 8) Y. Fujishiro, R. Ishida, and M. Kubota: J. Spectrosc. Soc. Japan, **25**, 235 (1976).
- 9) 相馬憲一, 大豆畑 茂, 宮寺 博: 分光研究, **36**, 195 (1987).