



アルミニウム細線爆発現象における放射光

斎藤 弘*・尾崎 和正**

* 岩手大学工学部電子工学科 〒020 盛岡市上田 4-3-5

** 日立エンジニアリング株式会社 〒317 日立市幸町 3-2-1

(1983年1月31日受理)

Emission Light in Aluminum Wire Exploding Phenomenon

Hiroshi SAITO* and Kazumasa OZAKI**

* Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Iwate University,
4-3-5, Ueda, Morioka 020, Japan

** Hitachi Engineering Co., Inc.,
3-2-1, Saiwai-cho, Hitachi 317, Japan

We present the results of an experimental investigation of light emission in the exploding wire of Al thin wires. We obtained the time-integral spectra, time-resolved spectra and the conversion efficiency. The initial rise of the light emission in the exploding wire of Al thin wires partly originated in continuous spectrum. After the first rise of light emission, the Al ion's emission spectra appeared before the neutral atom's emission spectra and AlO molecule spectra were observed long time duration. A calorimeter for measuring the emission light energy of the exploding wires has been made. It consists essentially of a thermal detector and placed in the space between a spheroid converging mirror and one of the focuses on the axis of rotation. The conversion efficiencies about 15% were obtained.

1. ま え が き

細線爆発現象は金属細線や箔片などに瞬時に大電流を通じたとき、電気回路中に過大電流が流れ、回路に挿入されているヒューズが瞬時に溶断して飛び散る現象と同様に、音響的衝撃波と強い発光を伴い爆発的に溶断気化する現象である。

細線爆発現象に関する最初の論文は 1773 年 Nairne によるものとされている¹⁾。Nairne は 64 個のライデンびんに電荷を蓄積して、直径 0.15 ミルの鉄細線における細線爆発現象を観測している。1920 年には、Anderson が 3,000°C 以上の高温度を得ることを目的とした研究を行なっている²⁾。この時期より少し遅れ、わが国では理化学研究所の長岡、二神、町田らにより手作りの高速度写真機を使って、細線爆発現象における金属蒸気の広がり様子や膨張の速さを知らうとして実験が行

なわれている^{3,4)}。1959 年には、細線爆発現象に関する国際会議がボストンで開催され 1961 年には第 2 回の国際会議が開催されるほど多くの研究者により研究が行なわれている。これらの国際会議は 1967 年 (ボストン) を含めて 4 回開催され、発表論文は Chace と Moore によりそれぞれ 1 冊の本となり出版されている⁵⁾。研究の対象は細線爆発現象の物理的な進展過程に関する学問的な興味のほか、核融合反応におけるトリガー用としての高温度高密度プラズマを得ることを目指したものも多く研究されている。また、真空中における細線爆発現象による X 線の発生や、気体、液体中における衝撃波の発生、発光現象の化学反応への利用に関するものなど、広範囲な分野におよんでいる。筆者らは、細線爆発現象が音響的衝撃波と強い発光を伴う現象であることに注目し、光源として利用する立場から、比較的小入力エネルギーにおける細線爆発現象における放射光について研究を行なっている⁶⁻¹⁴⁾。

本文ではアルミニウム細線の細線爆発現象による放射光についての時間積分スペクトル, 時間分解スペクトル, 入力電気エネルギーに対する放射光エネルギーへの変換効率について実験結果と考察を述べる.

2. 実験装置

実験装置は自作の低残留インダクタンス型コンデンサー (67.7 nF, 残留インダクタンス 40 nH) に直流高電圧を供給するための 0~30 kV 可変できる自作の直流高電圧電源, およびコンデンサーに充電された電気エネルギーを金属細線に加えるための自作のトリガトロン型ギャップスイッチ, 細線を保持する電極を備えた容器より構成されている. これらの電気回路の構成を Fig. 1 に示す.

コンデンサーは, 厚さ 250 μm のルミラーシート (東レ, ϵ_r : 3.1) と厚さ 0.2 mm の銅板で構成された平行平板並列接続型で耐電圧を高くとの目的で 150 \times 400 \times 400 mm³ の絶縁油槽に入れている. ギャップスイッチは同軸構造を採用し, 放電時の閉回路インダクタンスを小さくおさえるようにしている. 金属細線は排気減圧可能な硬質アルミニウム製容器の中の間隙 37.7 mm の黄銅製対向電極間に張られるようになっている. 細線材料は 1% ケイ素を含んだ, 直径 36 μm , 30 μm , 25 μm のアルミニウム線である. この細線は発光分光分析の結果によると極く微量の金, カルシウム, 鉛, 鉄が混入している. 発光は容器に設けられている直径 30 mm, 厚さ 10 mm の熔融石英ガラス窓を通し観測するようになっている. この回路構成で細線部分を十分にインダクタンスの小さい銅板で短絡した状態における放電閉回路のパラメータ

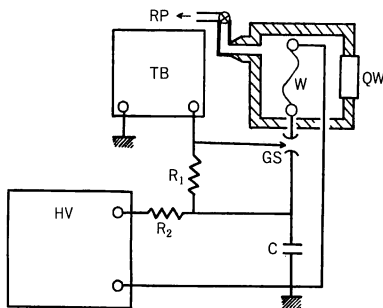


Fig. 1 The circuit diagram.

QW: quartz window, W: an Al wire, TB: trigger box, GS: gap switch, R₁: 8 M Ω , R₂: 50 K Ω , C: 67.7 nF, HV: high voltage power supply, RP: oil rotary pump.

の実測値は

$$\text{総合インダクタンス } L = 0.12 \mu\text{H}$$

$$\text{総合抵抗値 } R = 0.25 \Omega$$

$$\text{リングング周波数 } f = 1.9 \text{ MH}$$

であった.

3. 観測系

以下に本実験に使用した観測系について述べる. 分光写真以外の測定は細線爆発現象により発生する電磁放射雑音を避けるために自作のシールドルーム内で行なった.

3.1 時間積分スペクトル

前述の実験装置を用いて, アルミニウム細線による細線爆発発光を数回行ない分光写真器 (ナルミ RM-23 II, 600 本/mm, Bz 500 nm) で時間積分スペクトルの観測を行なった. 写真記録には Fuji Neopan SSS シートフィルムを使用し, 現像は Fuji ミクロファインで 20 $^{\circ}\text{C}$, 9 分間とした. 分光写真器の入射スリットは 150 μm とし, 細線から 300 mm の距離にした. 比較のためのデータはすべて同一測定条件になるようにした. 写真記録された結果は測微光度計 (島津 802 型) でその透過率を求め対数変換器 (島津 LS-501) で黒化度表示 (0~3) に変換した.

3.2 時間分解スペクトル

大気圧雰囲気中で, 印加電圧 20 kV で, アルミニウム細線爆発発光を生じさせ, その発光を入射スリット 100 μm , 出射スリット 555 μm に設定した回折格子型分光器 (リッター, MC-20N) を通し, 波長幅 2 nm で 250~560 nm まで変化させ, 分光器の出射スリット側に取り付けられた光電子増倍管 (HTV, R106) で検出しストレージョシロスコープ (HP-1744A, 100 MHz) に表示させ, その波形を写真で記録した.

時間分解スペクトルを得るには, これらの発光強度の時間変化特性の波形より, おおのこの時間におけるその振幅を読みとり, その値を分光器の回折効率, 高次光カットフィルターの透過率, 光電子増倍管の波長感度特性で補正して, 250~560 nm に渡る時間的なスペクトル変化として求めた.

3.3 放射光エネルギー

硬質アルミニウム製の自作した回転楕円型集光器¹⁵⁾を使い回転軸上の一方の焦点と長軸上の壁面 (鏡面) との間にアルミニウム細線を張り, 他方の焦点と長軸上の壁面 (鏡面) との間に集光する光の強さを, 複写用のドライ感光紙を使って観測した¹⁶⁾. ドライ感光紙上に直径約

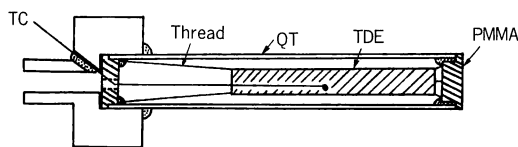


Fig. 2 Schematic diagram of the structure of a dry calorimeter (a thermal sensor).
TC: thermocouple, QT: quartz tube,
TDE: thermal detective element,
PMMA: polymethylmethacrylate.

2 mm の細く、強い集光パターンが観測できた。これらの放射光エネルギーを測定するために、**Fig. 2** に示すようなドライカロリメーターを自作した⁸⁾。

この測定素子は、厚さ 0.2 mm、長さ 70 mm、直径 13 mm のニッケルの円筒 (質重 $M=6.954$ g) を作りその内壁に、細い銅コンスタンタン熱電対を取り付け、円筒表面にはヒタゾール (日立、潤性導電剤) を塗布し、油性分をガスバーナで加熱蒸発させ、黒色つや消しの表面とし、これを図のように真空中に排気できる透明石英管内に、白い糸で吊って保持している。このドライカロリメーターの感温部分は、比熱 $c=0.101$ cal/g·deg、熱容量 $MC=0.702$ cal/deg である。したがって、この感温部分が Δt だけ温度上昇するときの吸収されたエネルギーの値 E は

$$E=4.19MC\Delta t \quad (\text{J}) \quad (1)$$

で表わすことができる。このドライカロリメーターを回転楕円筒型集光器の集光部分に取り付けて、感温部分を油回転ポンプで排気し、放射光エネルギーを測定した。測定は、アルミニウム細線爆発発光を行なわせたとき、室温で熱平衡させた銅ブロックと感温部分の温度差を熱電対で検出し、発生電圧の時間変化をレコーダーに記録

させる。発生電圧の時間減衰特性値を片対数グラフに書きグラフを外挿して、発光の瞬間における起電圧を求め、そのときの温度上昇 Δt に換算し(1)式より放射光エネルギーを求めた。測定は3回行ない平均値を求めた。ただし、銅コンスタンタン熱電対の起電力を 40.7 $\mu\text{V}/\text{K}$ (25°C 付近) とした。感温部分に注入される放射光エネルギーの波長特性は、感温部分を真空中に保つため使用した熔融石英ガラス管の波長透過特性、および回転楕円筒集光器の波長反射特性により、約 0.3~2.0 μm の波長範囲に制限されている。

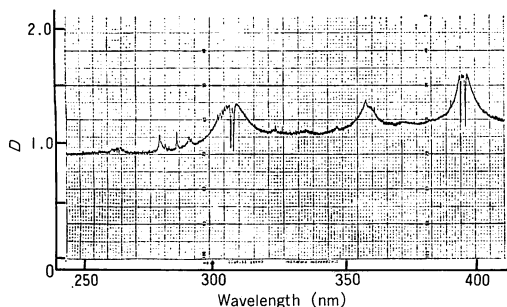
4. 実験および結果

4.1 時間積分スペクトル

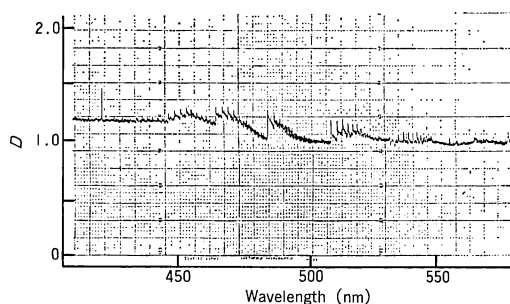
1%のケイ素を含む直径 30 μm のアルミニウム線を2本振って太くした長さ 37.7 mm の細線に印加電圧 20 kV を加え、細線爆発発光させて分光写真器で記録した。

細線爆発発光は3回行ない、それを重ねて露光させた。分光写真器でフィルム上に記録されたスペクトルを黒化度表示 ($D=0\sim 3$) したものを **Fig. 3** に示す。

Fig. 3 (a) で注目されるのは Al I の 256.8-257.5 nm ($3d^2D_{3/2,5/2}\rightarrow 3p^2P^0_{1/2}$), 265.2 nm, 266.0 nm ($5s^2S_{1/2}\rightarrow 3p^2P^0_{1/2}$), 308.2 nm, 309.3 nm ($3d^2D_{3/2,5/2}\rightarrow 3p^2P^0_{1/2}$), 394.4 nm, 396.2 nm ($4s^2S_{1/2}\rightarrow 3p^2P^0_{1/2}$) のいずれ¹⁷⁾も、Al I の基底状態と、低エネルギー準位項との間に自己反転による強い吸収線を生じていることである。このことについては、時間分解スペクトルの結果と合せてのちほど考察を加える。その他の中性アルミニウム原子の輝線スペクトルと一価イオンによる発光スペクトルを生じている。



(a)

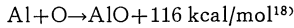


(b)

Fig. 3 The optical densitometer traces of the light emission spectra of exploding wire on the Al wires.

Wires: 1% Si-Al, 30 μm $\times 2$, Applied voltage: 20 kV.

Fig. 3 (b) ではアルミニウム細線爆発現象で生じたアルミニウム原子が雰囲気中の酸素と反応し、



AlO の分子スペクトル ($A^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$) を強く生じている。これらはそれぞれ振動量子数の変化分 $\Delta v = 2(447.0 \text{ nm}), 1(464.8 \text{ nm}), 0(484.2 \text{ nm}), -1(507.9 \text{ nm}), -2(533.7 \text{ nm})$ でそれぞれ長波長側に尾を引く回転準位の発光を伴っている。

アルミニウム粉末を熱して酸化させると最終的には、 Al_2O_3 となり約 380 kcal の酸化生成熱を発生することが知られている^{19,20)}。

4.2 時間分解スペクトル

実験値より求めた時間分解スペクトルを Fig. 4 に示す。発光開始より 0.5 μs 後のスペクトルは紫外線部分に強い発光がありこれはおもに雰囲気ガスによる発光と推測される²¹⁾。

Fig. 5 に連続発光スペクトル部分、AlO 分子発光スペクトル、Al II, Al I の代表的な発光スペクトルの時間変化波形を示す。連続発光スペクトル成分と AlO 分子発光スペクトルは発光の時間的な変化特性がよく似ているが、AlO 分子スペクトルの発光は弱い発光が長時間残ることが特徴である。そして、これらの発光が最大強度を示すのは発光開始後 300~400 ns 遅れた時間である。これよりさらに 300~400 ns 遅れてアルミニウムの

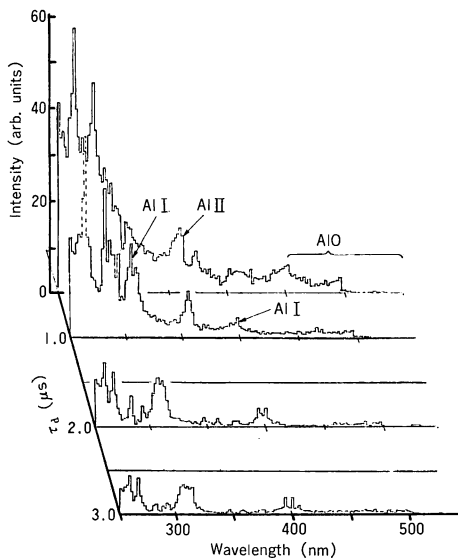


Fig. 4 The time resolved spectra in exploding wire on Al wire. τ_d is the delay time, 0.5 $\mu\text{s}/\text{div}$, Wires: 1% Si-Al 25 μm , Applied voltage: 20 kV.

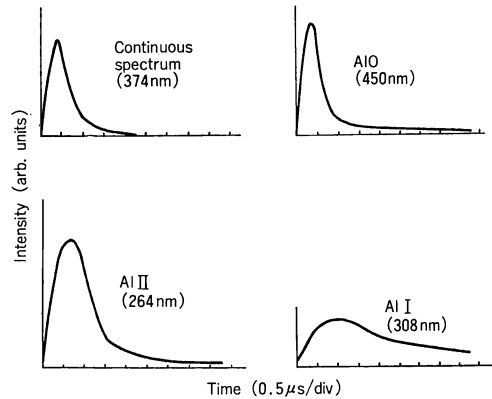


Fig. 5 The emission light decay characteristics in exploding wire on an Al wire. The time scale is 0.5 $\mu\text{s}/\text{div}$, Wires: 1% Si-Al 25 μm , Applied voltage: 20 kV.

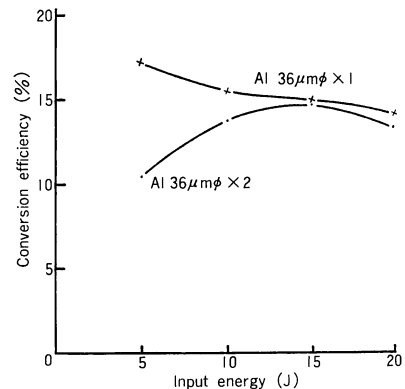


Fig. 6 The energy conversion efficiency from the input electrical energy into the output emission light energy.

一価のイオンによる発光が最大強度に達する。さらに、300~400 ns 遅れて中性アルミニウム原子の発光が最大値に達している。

4.3 放射光エネルギー

自作のドライカロリメーターを使用して約 0.2~2.0 μm の波長範囲における放射光エネルギーの総量を測定した⁸⁾。測定された値を入力電気エネルギーに対する変換効率として Fig. 6 に示した。

図中 Al 36 $\mu\text{m} \times 1$ と表示してあるものは 36 μm のアルミニウム細線 1 本、同様に $\times 2$ と表示したものは 2 本振って使用した場合である。2 本振った場合は入力エネルギーの小さいところでは正常な細線爆発現象を呈するには入力エネルギーが小さすぎることを示している。

アルミニウム細線1本を使用したとき、入力エネルギーの小さいところで変換効率が大きい理由は、アルミニウム金属の酸化生成熱の発生が寄与するためと考えられる。

5. ま と め

アルミニウム細線爆発現象における放射光について、時間積分スペクトル、時間分解スペクトル、放射光エネルギー変換効率を測定した。細線爆発現象は電気的入力エネルギー値の大きさを制限する要素はないので、一般的によく実験されているものは20 kJ以上の入力エネルギーの場合が多い。本文で扱ったものは細線爆発現象の閾値入力エネルギーに近い5~20 J程度の小入力エネルギーのものである。

Fig. 3(a)において、中性アルミニウム原子の基底状態と低エネルギー準位項との間で強い吸収が観測された。これより、細線爆発現象により生じた金属蒸気が、衝撃波を生じ周囲の冷たい気体と衝突を繰り返しながら膨張してゆくため、その表面における金属蒸気の層はエネルギー的には低く、基底状態を占めているものと考えられる。AlOの分子は細線爆発現象による雰囲気気体の発光と同時に発光し、かなりの長時間にわたって発光している。

アルミニウム細線爆発現象において、高温のアルミニウム原子が多数生成され、雰囲気中の酸素と反応してAlO分子を作り、やがてAl₂O₃分子となって飛び散るものと考えられる。その際、1 mol分子当たり約380 kcalの酸化生成熱を発生するため**Fig. 6**のエネルギー変換効率は入力エネルギーの小さいところで効率が高くなっている。

細線爆発現象で生じる衝撃波の波尾の部分は低気圧となるため放電が生じやすく、アルミニウムイオンはこの部分で励起されて生じているものと思われる。アルミニウムイオンは300~400 ns後には再結合により中性アルミニウム原子の励起状態を作っているものと考えられる。

時間積分スペクトルで強い発光を示している中性アルミニウム原子の発光は発光の立上り、立下り時間とも長く要し長時間発光している。雰囲気気体に関係するとと思われる連続発光スペクトルの部分は強く短時間の発光を示し、とくに紫外線部分は強力である。

終りに、常日頃激励とご指導をいただいている東北大学電気通信研究所教授稲場文男先生、岩手大学工学部教授一戸英敏、佐藤淳先生、実験中有益な助言をいただいた谷口宏先生、大学院修士研究でタングステン細線爆発発光について詳細な研究をしてくれた柴山正雄氏に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) E. Nairne: *Philos. Trans. R. Soc. London*, **64** (1774) 79.
- 2) J. A. Anderson: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **6** (1920) 42.
- 3) 長岡半太郎, 二神哲五郎, 町田敏男: *理化学研究所彙報*, 第6輯 (1927) 198.
- 4) H. Nagaoka and T. Futagami: *Proc. Imp. Acad. (Tokyo)*, **4** (1928) 198; **4** (1928) 283; **2** (1926) 254; **2** (1926) 387.
- 5) W. G. Chace and H. K. Moore: *Exploding Wires* (Plenum Press, New York, 1959); Vol. 2 (1962); Vol. 3 (1964); Vol. 4 (1968).
- 6) 斎藤 弘, 佐々木和彦, 田中 博: 昭和45年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 1D-6 (1970).
- 7) 斎藤 弘, 佐々木和彦: 昭和46年度日本分光学会講演会論文要旨 (1971).
- 8) 斎藤 弘: 昭和46年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 2C-27 (1971).
- 9) 斎藤 弘: *分光研究*, **20** (1971) 336.
- 10) 斎藤 弘, 谷口 宏: 昭和47年度電気四学会北海道支部連合講演論文集 (1972) p. 53.
- 11) 斎藤 弘, 石川利明: 昭和52年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 1E-16 (1977).
- 12) 尾崎和正, 松本和正, 斎藤 弘: 昭和55年度日本分光学会春講演会論文要旨集 (1980).
- 13) 斎藤 弘, 野沢 肇: 昭和56年度応物東北支部学術講演会予稿 (1981).
- 14) 野沢 肇, 斎藤 弘: 昭和57年度応物東北支部学術講演会予稿 (1982).
- 15) 友兼 泰, 斎藤 弘, 田上栄三郎: *応用物理*, **37** (1968) 633.
- 16) 斎藤 弘, 友兼 泰, 佐藤正香: *分光研究*, **17** (1968) 123.
- 17) S. Bashkin and J. O. Stoner, Jr.: *Atomic Energy Levels and Grotrian-Diagrams I* (North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1975).
- 18) V. I. Vedeneyev, L. V. Gurvich, V. N. Kondrat'yev, V. A. Medvedev and Ye. L. Frankevich: *Bond Energies Ionization Potentials and Electron Affinities*, English ed. W. C. Price (London Edward Arnold Ltd., 1962) p. 31, 97.
- 19) 井上 敏, 白井俊明: *化学概説IV, 金属* (岩波書店, 1948) p. 153.
- 20) 伊藤尚夫: *無機化学シリーズ11, 金属元素の化学* (培風館, 1972) p. 64.
- 21) 斎藤 弘, 辻 隆志: *分光研究*, **31** (1982) 89.