極超音速飛翔体周りに生じる三次元衝撃波の可視化に対する第二放電法*¹
**Second Electric Discharge Method for Visualizing Three Dimensional
 Shock Shapes around Hypersonic Vehicles**

西 尾 正 富*²
 Masatomi NISHIO

Key Words : Shock Waves, Hypersonic Flow, Flow Visualization

Abstract

This paper describes the second electric discharge method for visualizing three dimensional shock shapes around hypersonic vehicles. The method is based on the following ideas: When an electrical discharge is generated across a shock wave, the shock wave can be seen as a different radiation intensity in the electric discharge. Therefore, the three-dimensional shock shape can be visualized by taking a discharge photograph from the downstream side of the flow. In this paper, the reasons that the different radiation intensity occurs are mentioned qualitatively by considering the electric field distribution near the shock wave. As an example of this method, the shock shape around a delta winged semicone is visualized.

1. 諸 言

極超音速飛翔体周りに生じる三次元衝撃波の可視化は、その流れ場を理解する上で重要である。しかしながら、三次元衝撃波の有効な可視化手段は非常に少ない。衝撃波の可視化法としてよく知られているシュリーレン法やマッハツェンダ干渉計のような光学的方法は、二次元衝撃波形状や限られた衝撃波形状の可視化はできるが、三次元衝撃波形状の可視化は一般には困難である。

三次元衝撃波の可視化法として、先に、筆者は第一放電法^{1,2)}を開発してきた。さらに、第二放電法を開発し、三次元衝撃波の可視化がより容易に行うことができるようになったので、この第二放電法について述べる。

この第二放電法は衝撃波を交差するように放電を生じさせると、衝撃波の位置で、この放電路に他の領域

とは異なった強さの発光を生じさせることを利用している。この放電路中の異なった強さの発光をする明るい部分または暗い部分は、気流の前方や後方からも観測ができ、従って、三次元衝撃波の可視化が可能になる。

本論文では、衝撃波を交差するように発生させた放電路からの発光強さが、衝撃波の位置で、他の領域からの発光強さと異なるようにできる理由を定性的に明らかにする。

2. 定性的可視化理論

十分短い放電時間の放電路からの発光強さは、電場中を走行する電子のエネルギーに対する励起関数と分子数密度の積に比例することが知られている¹⁾。この電子エネルギーを衝撃波の位置で適度な値にし、衝撃波の位置での放電路からの発光の強さをコントロールして、衝撃波の位置を可視化することができる。その可視化理論を定性的に述べる。

衝撃波を交差するように放電を生じさせた時、衝撃波層内と一様流中に発生するイオン濃度の程度は、第1図に示すように、電子エネルギーの関数であるイオン化効率曲線³⁾によって見積もることができる。第1図は種々の気体のイオン化効率曲線を示しているが、一般に、どの気体のイオン化効率曲線も同様の傾向があることが知られている。電子エネルギーがあまり大きくない範囲、即ち、イオン化効率曲線が最大値になるまでの範囲では、近似的にみるとイオン化効率曲線は直線的に増加しているのが分かる。従って、電子エネルギー値のこのような範囲に対して、イオン化効率 S は、近似的につぎのように表すことができる。

$$S = ap(W - V_i) \quad (1)$$

ここで a, p, W, V_i はそれぞれ、定数、気体圧力、電子エネルギー、イオン化ポテンシャルを表す。電場中の平均電子エネルギー W は次式で表せる⁴⁾。

*¹ 平成5年1月16日、平成4年度衝撃波シンポジウムにて講演。平成5年2月10日原稿受理

*² 福山大学工学部機械工学科

第1図 気体のイオン化効率曲線¹⁾

$$W = K_1 \frac{E_1}{P} \quad (2)$$

ここで K_1 , E_1 はそれぞれ定数, 電極間に印加する電圧により発生する衝撃波近傍の電場強さを表す. これらのことから, 衝撃波層内と一様流中に生じるイオン濃度の比 I_s/I_∞ は

$$\begin{aligned} I_s/I_\infty &= S_s/S_\infty \\ &= P_s \left\{ K_1 \frac{E_1}{P_s} - V_1 \right\} / P_\infty \left\{ K_1 \frac{E_1}{P_\infty} - V_1 \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

で表せる. ここで添字 s と ∞ は衝撃波層内と一様流中を表す. (3)式より判断して, 適当な E_1 を与えることにより,

$$I_s/I_\infty \ll 1 \quad (4)$$

または

$$I_s/I_\infty \gg 1 \quad (5)$$

を満たすことができる. そして, このとき発生するイオンにより生じる衝撃波近傍の電場 $E_2(x)$ は次式で表すことができる.

$$E_2(x) = \frac{K_2}{4\pi\epsilon} \int_{x_1=-L}^{x_1=+L} \frac{\rho(x_1)}{(x-x_1)^2} dx_1 \quad (6)$$

ここで $\rho(x_1)$ は $x=x_1$ のイオン電荷濃度を, $x_1=0$ は衝撃波の位置を, L は衝撃波の位置から陰極側にとった適当な距離を表すものとする.

衝撃波近傍の電場 E_1 は, 第2図に示すように衝撃波前後ではほぼ一定の値として表すことができる. そして, (4)式を満たす場合の E_2 は, (6)式の物理的意味からと, 衝撃波面は有限の厚さを有する事を考えると, 第3図に示すように, 衝撃波の位置で電場がドロップするように描くことができる. 逆に, (5)式を満たす場合の E_2 は, 第3図の場合と同様に考えて, 第4図に示すように, 衝撃波の位置で急峻に立ち上がる

第2図 電極間に印加する電圧により生じる衝撃波近傍の電場 E_1 第3図 $I_s/I_\infty \leq 1$ を満たす場合のイオンにより生じる衝撃波近傍の電場 E_2 第4図 $I_s/I_\infty \geq 1$ を満たす場合のイオンにより生じる衝撃波近傍の電場 E_2

ように描くことができる. 従って, E_1 と (4) 式を満たす場合の E_2 を加えた衝撃波近傍の電場分布は第5図のように表せる. そして, E_1 と (5) 式を満たす場合の E_2 を加えた衝撃波近傍の電場分布は第6図のように表せる. 第7図には電子エネルギーに対する窒素の励起関数⁵⁾を任意のスケールで示している. この図

によると電子エネルギーが、窒素の励起ポテンシャルである、13 eV 程度より小さい場合、電子励起はほとんど生じない。すなわち発光はほとんど起らない。また、電子エネルギーが 20 eV 程度になると電子励起が活発になり強い発光が生じることが予測される。適当な実験条件を設定することにより、衝撃波の位置で

の電場強さを十分小さく、又は適度に大きくして、この位置での電子エネルギーを 13 eV 程度よりも十分小さくしたり、20 eV 程度にすることを考えることができる。この結果、衝撃波の位置に暗部、または明部を生じさせることができる。この暗部または明部は気流の前方から、あるいは後方から写真観測できるので、三次元衝撃波の可視化が可能になる。

3. 可視化例

本方法による可視化例として、マッハ数 10 の極超音速気流中に置かれたくさび周りに生じる衝撃波の可視化を行う。

初めに、

$$I_s/I_\infty \ll 1$$

の場合、即ち、衝撃波側よりも一様流側にイオンを多く発生させた場合の衝撃波の可視化例を第 8 図に示す。この可視化写真から分かるように、放電路中に暗部が生じている。その暗部の位置は、シュリーレン写

第 5 図 E_1 と $I_s/I_\infty \ll 1$ を満たす場合の E_2 を加えた、衝撃波近傍の電場

第 6 図 E_1 と $I_s/I_\infty \gg 1$ を満たす場合の E_2 を加えた、衝撃波近傍の電場

第 7 図 任意のスケールで表された窒素分子の励起関数⁵⁾

第 8 図 $I_s/I_\infty \ll 1$ を満たしていると考えられる場合の衝撃波の可視化例

第 9 図 $I_s/I_\infty \gg 1$ を満たしていると考えられる場合の衝撃波の可視化例

真から得られる衝撃波の位置とよく一致しているのが確認されており、この可視化法により得られる衝撃波形状は妥当なものであると考えられる。

さらに、

$$I_s/I_\infty \gg 1$$

の場合、即ち、衝撃波側に一樣流側よりも多くのイオンを発生させた場合の衝撃波の可視化例を第9図に示す。この可視化写真では、放電路中に明部が生じているのが僅かに確認できる。その明部の位置も、シュリーレン写真から得られる衝撃波の位置とよく一致していることが確認されており、この可視化法により得られる衝撃波形状も妥当なものであると考えられる。

以上の二種類の場合における可視化例により、定性的に予測した如く、衝撃波の可視化ができることが示された。ただし、これまで述べてきた定性的議論は、一樣流側に陰極を、模型側に陽極を配置した場合の議論である。

次に、この第二放電法を用いて、極超音速流中に置

第10図 三角翼付き半円錐模型と電極の配置図

第11図 三角翼付き半円錐模型周りに生じる衝撃波の可視化例

かれた三角翼付き半円錐物体周りに生じる衝撃波形状の可視化を行う。模型と電極の配置を第10図に示す。この場合に生じる放電路の観測は、鏡を気流の後方に配置し、これに放電路を反射させて、観測窓を通して写真観測している。その可視化結果を第11図に示す。第11図にはシュリーレン法のような光学的な方法では可視化が困難と考えられる翼と物体の間に生じている衝撃波形状が可視化されている。

4. 考 察

衝撃波を交差する放電路からの発光に関して、衝撃波の位置で明部や暗部が生じる理由は、本論文で述べてきたような電場によって加速される電子のエネルギーの問題と異なる理由にも求められるかも知れない。例えば、衝撃波の位置における気体の密度変化による光の屈折、あるいは、衝撃波の位置における、光の放出、吸収が影響していると考えられるかも知れない。そこで、他の要因による影響について調べる。このため、電極間に印加する電圧の極性を逆にして放電を生じさせた。この時の可視化写真を第12図に示す。この場合には、衝撃波の位置で明部や暗部が発生していない。このことは、衝撃波の位置における密度変化による光の屈折、あるいは、衝撃波の位置における、光の放出、吸収などの要因は、本可視化法に関しては、無視し得る問題であり、可視化理論で述べてきた如く、電場が主要な要因であると考えられる。

可視化理論に於いて、理論上は、衝撃波の位置で、放電路からの発光を衝撃波前後からの発光よりも、強くすること及び弱くすることが可能であることを述べ

第12図 電極に印加する電圧の極性を逆にした場合の放電写真

てきた。しかし、実際の実験では、写真観測が十分可能な程に衝撃波の位置からの光を強くすることは、かなり難しいと考えられる。第7図にも示されている如く、気体の分子の励起関数は、衝突する電子エネルギーの増加に対して、ある値で最大となり、その後は減少する。このことは、衝撃波層側に多くのイオンを発生させ過ぎると、電子エネルギーは大きくなり過ぎて、衝撃波の位置からの発光は逆に減少する。可視化実験に先立って、予め衝撃波の位置における励起関数を最大値に近付ける電子エネルギーを得る実験条件を求めることは困難なことのように思われる。従って、実際の実験では、衝撃波の位置を暗くする場合、即ち、一様流側に多くのイオンを発生させることを考える方が、実験は容易であると考えられる。

5. 結 論

本論文では、極超音速飛翔体周りに生じる衝撃波の可視化法である第二放電法について述べてきた。初めに、第二放電法の可視化理論を定性的に述べた。この可視化理論によると、衝撃波を交差する放電路からの発光を、衝撃波の位置で、衝撃波前後よりもひときわ明るく、又は暗くすることができる。そして、この可

視化理論に沿って、くさびに生じる衝撃波の可視化を例示した。さらに、三次元衝撃波の可視化例として、シュリーレン法のような光学的な方法では可視化が困難と考えられる。極超音速飛翔する三角翼付き半円錐周りに生じる衝撃波形状を可視化して示した。

以上の結果から、この第二放電法と、先に示してきた第一放電法を併用すれば、極超音速飛翔体周りに生じる三次元衝撃波形状の可視化がより一層簡単になるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) Nishio, M.: Qualitative Model for Visualizing Shock Shapes, AIAA J., **30** (1992), pp. 2346-2348.
- 2) 西尾正富: 極超音速飛翔体周りに生じる三次元衝撃波の放電を用いる可視化法の定性的理論, 日本航空宇宙学会誌, **40** (1992), pp. 646-651.
- 3) Engel, V.: Ionized Gases, Oxford University Press, 1965, pp. 62-63.
- 4) Engel, V.: Ionized Gases, Oxford University Press, 1965, pp. 122-123.
- 5) Alferof, V.I., Okerblom, T.I. and Sarantsef, A.I.: Experimental Study of Vortex Flow about Low Aspect Ratio Wings and Circular Cones at $M=2$, AN SSSR, Mekhanika Zhidkosti i Gaza, **2**, No. 5 (1967), pp. 113-123.