

## 矩形管から放出される衝撃波

阿部 晃久\* 伊藤 勝宏\*\* 高山 和喜\*\*\*

### Numerical Simulation of Shock Wave Emanating from a Square Shock Tube

by

Akihisa ABE

*Institute of Fluid Science*

*Tohoku University*

Katsuhiro ITOH

*National Aerospace Laboratory*

Kazuyoshi TAKAYAMA

*Institute of Fluid Science*

*Tohoku University*

#### ABSTRACT

We studied the flowfield behind a shock wave emitted from a square shock tube. Being three-dimensional, it allows to observe various phenomena for axisymmetric flow such as distorted vortex ring structure generated from the shock tube exit, shock wave deformation and a variety of flow structures behind the shock wave. If the generative mechanisms of distorted vortex ring and flows from the shock tube are clear, this also contributes to the technical advancing, regarding the mixture of different chemical species, as, e.g., fuel and an oxidizing agent, etc.

In this paper, the shock wave emanating from a square shock tube was studied in numerical simulation and shock tube experiment, as well. In order to simulate these flow fields, a second order upwind TVD finite difference scheme (Harten-Yee type) was used. This TVD scheme, having been used for two-dimensional problems, was extended to three-dimensions and applied to Euler equations. The computational domain of  $60 \times 60 \times 60$  grid points covers a quarter of the shock tube cross section. As an initial configuration we took a normal shock wave with Mach number 1.5. The numerical results were compared with data from optical measurements. The double exposure holographic interferometry was used to photograph the emerging shock wave. We were able to obtain good qualitative agreement between numerical results and experimental ones. The formation of shock wave and the generative mechanism in the unsteady three-dimensional shock tube flow are discussed by detailed analysis of the numerical results, and these flow properties were clarified.

---

\* 東北大学・流体科学研究所・衝撃波工学研究センター

\*\* 航空宇宙技術研究所・角田支所

\*\*\* 東北大学・流体科学研究所・衝撃波工学研究センター

## 1. 緒 言

非円形断面の管から衝撃波が放出されると、衝撃波面に対する膨張波の影響の非対称性から衝撃波面形状の変化およびその背後の流れが軸対称現象とは大きく異なることが知られている<sup>1,2)</sup>。特に、管出口から発生する渦輪構造に特徴が見られ、渦輪は大きく歪む。このような非対称渦輪構造の生成メカニズムや流れを解明することにより、例えば酸化剤と燃料の混合を促進させ燃焼効率を向上させる技術開発の可能性も考えられる。本研究では、マッハ数1.5の垂直衝撃波が正方形断面の衝撃波管から放出される時に生じる現象を数値計算ならびに衝撃波管実験により解明した。数値計算は、三次元に拡張した二次精度風上型分法によりオイラー方程式を解いた。可視化実験には、二重露光ホログラフィ干渉計法を用いた。これらの比較から三次元流れ場の構造について検討する。

## 2. 数 値 計 算

数値計算は、これまで開放端から放出される二次元および軸対称現象のシミュレーションに用いてきた二次精度風上型 TVD 差分法<sup>3,4)</sup>の計算コードを新たに三次元に拡張して行った。計算領域は、図1に示すような衝撃波管の1/4断面を含む60×60×60格子の立方体空間である。初期値は、正方形断面管内にマッハ数1.5の垂直衝撃波の解を置いた。

## 3. 実 験

実験は、圧力型衝撃波管を用いて行った。衝撃波管高圧室は、長さ1.1m、直径70mm、低圧室は、長さ0.85m、直径70mmの管に長さ0.83m、断面40mm×40mmの正方形断面管を接続してある。試料気体は、空気(大気圧)、駆動気体は、ヘリウムである。隔膜には、厚さ50 $\mu$ mのマイラー膜を使用した。得られた衝撃波マッハ数は、1.5である。

可視化には、二重露光ホログラフィ干渉計法を用いた。正方形断面から放出される流れ場の特徴

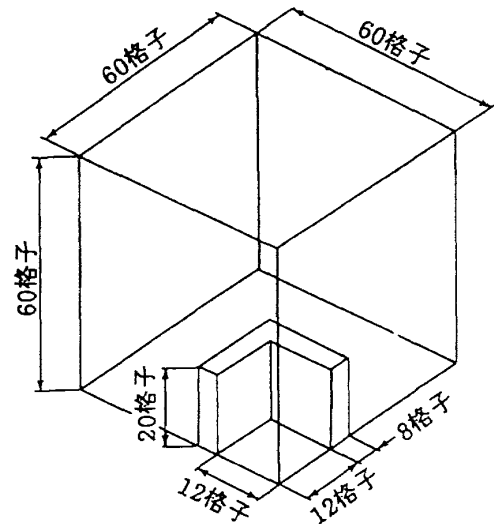


図1 計算領域

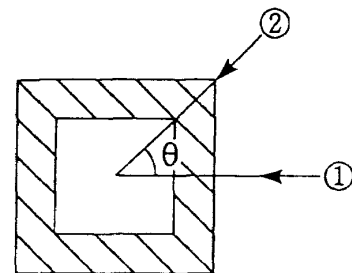


図2 可視化撮影方向

を良く観察するために図2に示す $\theta=0^\circ$ 、 $45^\circ$ の二方向から撮影を行った。

## 4. 結果と考察

図3(a), (b)に図2の $\theta=0^\circ$ 、 $45^\circ$ それぞれの方向から二重露光ホログラフィ干渉計法で撮影して得られた干渉計写真を示す。ここで、干渉縞は、三次元現象内部を通過する光路に沿って積分された密度分布を示しているため、現象内部の等密度線には直接対応しない。干渉縞分布を定性的に観察すると、管端から発生する渦輪が存在していると考えられる空間で、(a)の縞分布は両側が下がった逆V型となるのに対して、(b)ではW型形状となり $\theta=0^\circ$ 、 $45^\circ$ 方向で干渉縞分布が大きく異なることがわかる。また、(a)で観察される二次衝撃波の形状は大きく湾曲しており、管幅(管断面の一辺の長さ)を越える大きさであることがわかる。これに対し(b)では、(a)の場合と異なり、二次衝撃波に

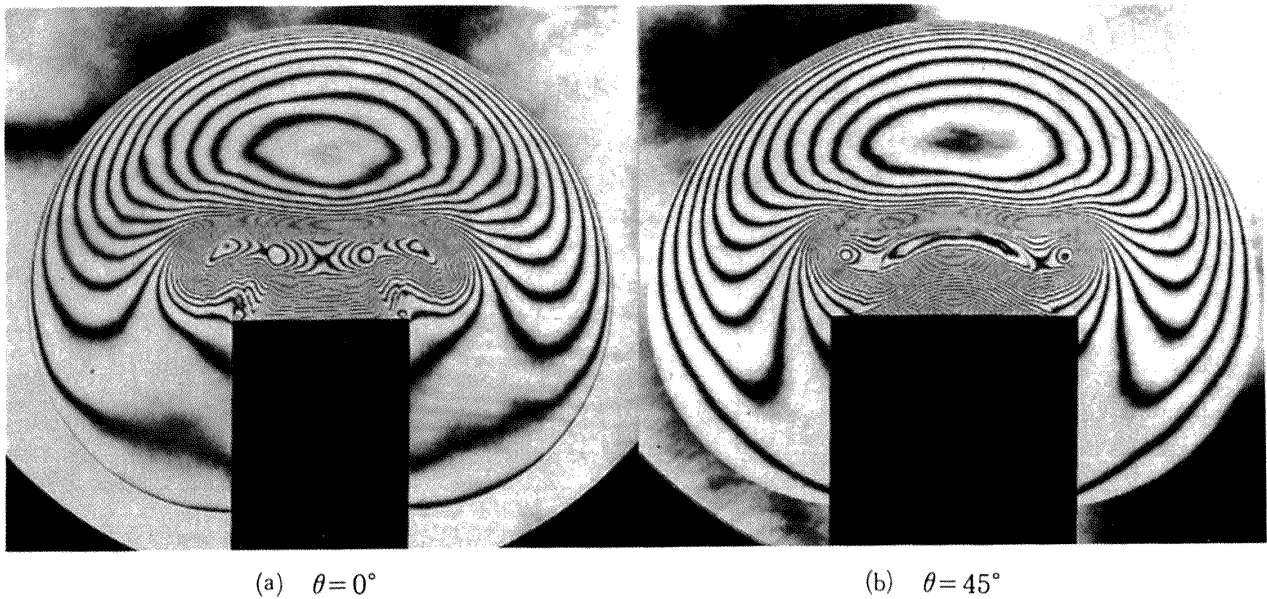


図3 干渉計写真

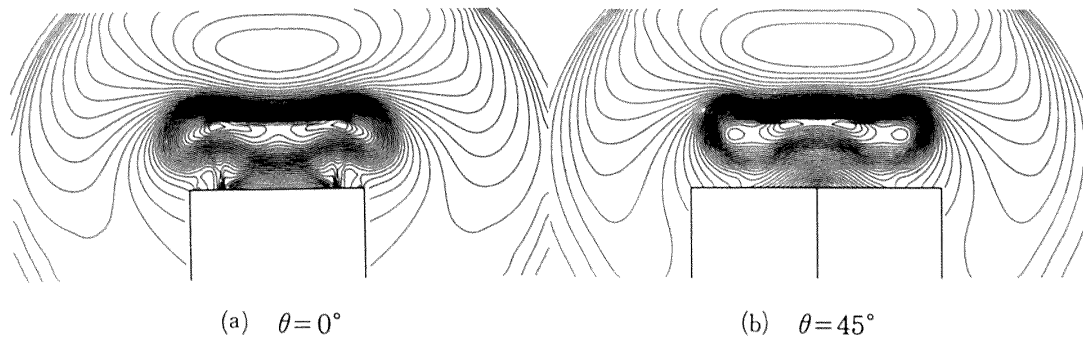


図4 数値計算から得られた縞分布

大きな湾曲は見られず、ほぼ管幅（管断面の対角線の長さ）に等しい大きさであることがわかる。さらに(b)では、管出口角から斜め衝撃波が発生しており、これは $\theta=0^\circ$ 方向からでは観察されない現象である。以上のように、干渉計写真の撮影方向で縞分布が変化することは、管出口から発生する渦輪構造が歪んでいることを意味する。次に、数値計算の結果を示す。

図4(a), (b)は、数値計算結果から得られた密度分布を光路方向に積分して求めた縞分布であり、それぞれ図3(a), (b)に対応する。図4(a)では、管出口付近での縞分布の形状が逆V型となり、計算格子が粗いにもかかわらずかなり実験と良く一致している。図4(b)の場合も、縞分布がW型となることなど定性的に良い一致が得られた。以上から、

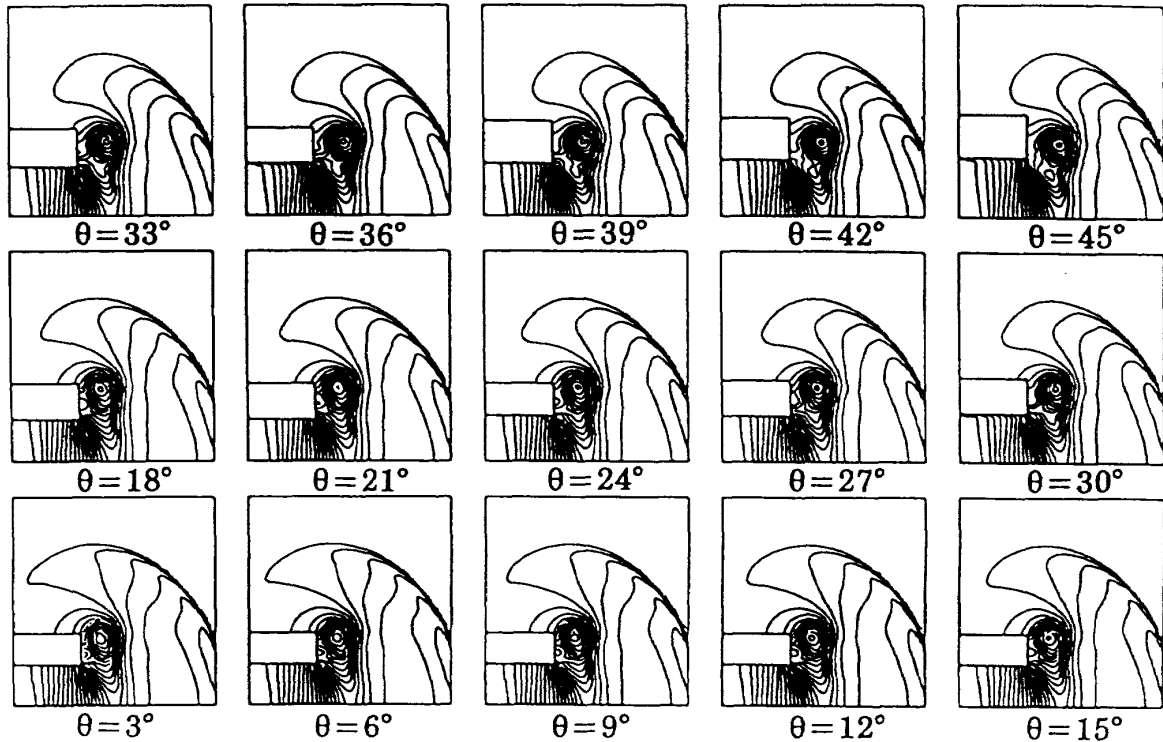
数値計算結果は、実験結果を十分良くシミュレートしていると判断し、次に、現象内部の流れ構造について考察する。

$\theta=3^\circ\sim 45^\circ$ 断面の等密度線図を図5(a), (b)に示す。図5(a)は、計算ステップ40で得られた各断面の等密度線図である。 $\theta=3^\circ$ 断面と $\theta=45^\circ$ 断面との比較より、衝撃波面形状、渦形状および位置、さらに、出口からの流れ場の様子などで違いが生じていることがわかる。特に、 $\theta=3^\circ$ 断面で発生する渦の位置よりも、 $\theta=45^\circ$ 断面で発生する渦の方が下流に位置することから、正方形断面管から発生する渦輪の構造が歪むことがわかる。

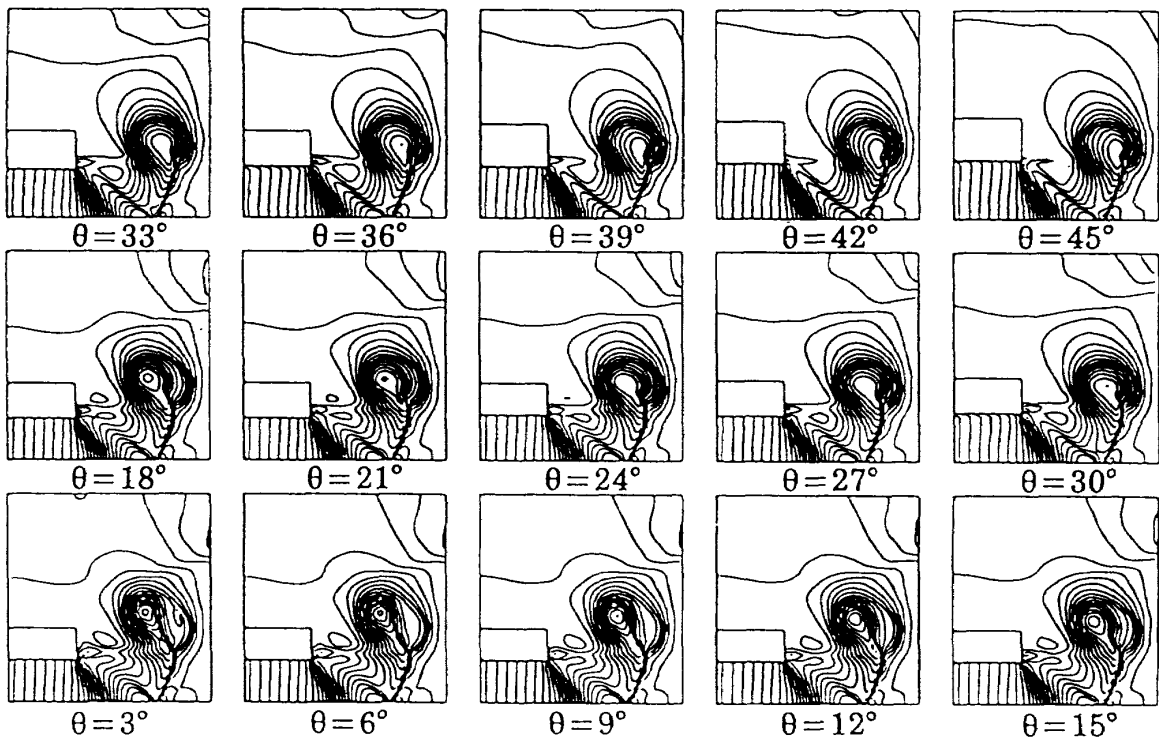
図5(b)は、計算ステップ100で得られた $\theta=3^\circ\sim 45^\circ$ 断面の等密度線図である。 $\theta=3^\circ$ 断面と $\theta=45^\circ$ 断面との比較から、流れ場に発生している二次衝

撃波の形状、渦形状およびその位置さらに、管出口角から発生している斜め衝撃波などの違いが明白である。 $\theta=3^\circ$  断面では、渦中心位置が下流方向から大きくそれており、それとともに大きく湾曲した二次衝撃波が存在している。 $\theta=45^\circ$  断

面では、渦中心位置がほぼ下流方向に沿って移動していることから $\theta=3^\circ$  断面で見られるような二次衝撃波の湾曲は見られない。また、 $\theta=45^\circ$  断面では、管出口角から斜め衝撃波が生じているが、 $\theta=3^\circ$  断面では、それは観察されないなど、図3



(a) Time step=40



(b) Time step=100

図5 等密度線図

で示した実験結果と非常に良く一致する。

次に、管出口から発生する渦輪構造の変形がどのように生じるのかについて検討する。図6(a), (b)は、 $\theta=0^\circ$ 断面および $\theta=45^\circ$ 断面での等渦度線図の時間変化である。これより、 $\theta=0^\circ$ 断面での渦度の方が大きく、また、その分布は、 $\theta=45^\circ$ 断面で流れ方向に成長していくのに対して、 $\theta=0^\circ$ 断面では、下流方向からそれと大きく湾曲していくことがわかる。

図7は、左半分が $\theta=0^\circ$ 、右半分が $\theta=45^\circ$ 断面での等圧力線図である。管中心での圧力分布は $\theta$ の値に関わらず等しい値であるが、 $\theta$ の値により、管中心から管壁面までの距離が異なることから、管出口から流出する流れに対する膨張波の影響が異なる。このため、 $\theta=0^\circ$ 断面での流れは、管出口から大きく拡大する流れとなり、渦は、下流方向からそれと方向へと移動する。これに対して、 $\theta=45^\circ$ 断面での流れは、流れの下流方向成分の影響が大きく、渦は下流方向へ移速することになる。したがって、 $\theta=0^\circ$ 、 $45^\circ$ 断面での渦中心の移動方向および位置の違いから渦輪構造の変形が生じることになる。

図8は、流れ方向に垂直な速度成分を流れ方向の速度成分の5倍にして表した速度ベクトル図で

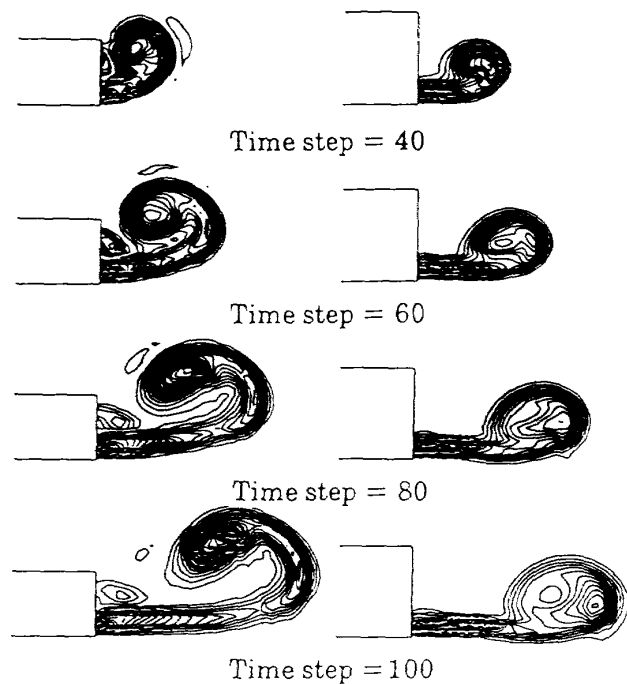


図6 等渦度線図

ある。図7と同様に左半分が $\theta=0^\circ$ 断面、右半分が $\theta=45^\circ$ 断面図である。先に述べたように、 $\theta=0^\circ$ 断面での流れは、下流方向に垂直な速度ベクトル成分が大きく、渦の進行方向が $\theta=45^\circ$ 断面と異なった方向になることがわかる。従って、 $\theta=0^\circ$ 断面の場合、渦は下流方向への移動が遅く管出口からなかなか遠ざかることが出来ないのに対し、 $\theta=45^\circ$ 断面では、渦は流れ方向に急速に遠ざかって行く。このため、 $\theta=45^\circ$ の場合、管出口からの流れの圧力値と背圧の関係が過膨張流れのそれと類似となり、斜め衝撃波が発生することになる。

### 5. 結 言

正方形断面の衝撃波管解放端から放出される衝撃波背後の流れについて、数値計算および衝撃波管実験を行い以下の結果を得た。

(1) 正方形断面の衝撃波管から放出される衝撃波背後の流れを二重露光ホログラフィ干渉計法で二方向から撮影を行い、得られた干渉計写真より

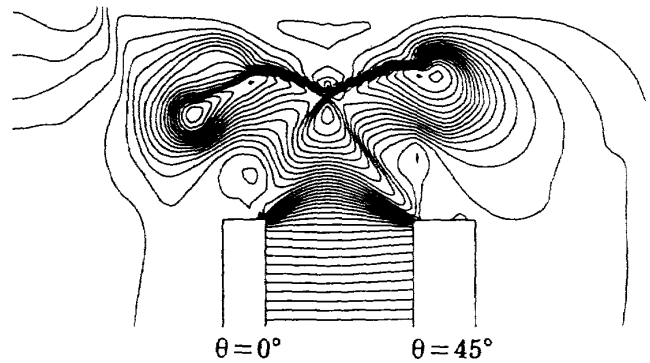


図7 等圧力線図

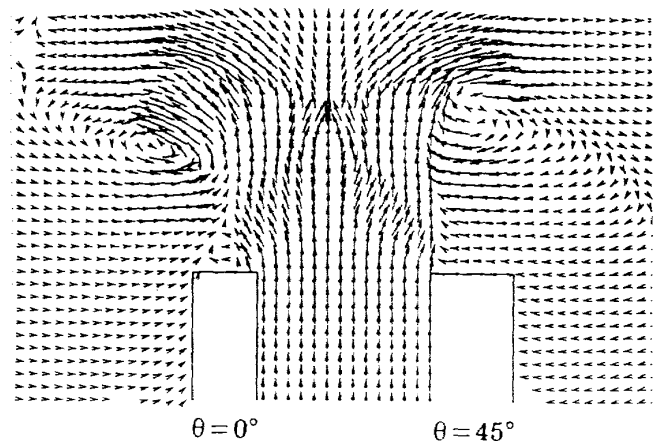


図8 速度ベクトル図

管出口から発生する渦輪構造が歪むことを確認した。

(2) 三次元に拡張した二次精度風上型 TVD 差分法を用いてオイラー方程式を解き、実験結果との比較から定性的に良好な一致を得た。

(3) 数値計算から、可視化実験では観察出来ない現象内部の流れのメカニズムを検討し、管出口で発生する非対称な膨張波の影響により、渦輪構造の歪み、二次衝撃波の空間的な形状および斜め衝撃波の発生の様子などを明確にした。

おわりに、本研究は、平成2年度文部省科学研究費(奨励A(特別研究員)、課題番号02952137)の補助を受けて行われた。

### 参 考 文 献

- 1) K. C. Schadow et al., AIAA J. (1989).
- 2) 手島光司: 衝撃工学シンポジウム(1989).
- 3) A. Abe & K. Takayama: JSME, Int. J. Vol.33, No.2 (1990).
- 4) H. C. Yee: NASA Technical Memorandum 101088 (1989).