

第 6 章 可視化画像の衝撃波抽出

第 4 章や第 5 章で述べた放電発光法による流れ場の可視化結果に対し、より鮮明に衝撃波の抽出を行うことを目的に、画像処理を施す。本章では、その方法や結果、考察について述べる。

6.1 概要

第 4 章や第 5 章では、半球模型や極超音速飛行体周り流れ場の放電発光法による可視化について述べた。放電発光法による可視化結果は、シュリーレン法などの光学的方法による可視化結果と異なり、衝撃波の部分がはっきりしない場合がある。そこで、本章ではより衝撃波を鮮明にすることを目的に、放電発光法により得られた可視化画像に対し、画像処理を施す。

6.2 画像処理の基礎知識

ここでは、画像処理を行うにあたり必要な基礎知識について述べる。より詳細は、参考文献[20][21][22]を参照してほしい。

6.2.1 デジタル画像[20]

二つの座標軸 x 、 y および濃度値 g の連続値で与えられる画像をアナログ画像という。アナログ画像の代表的なものは、レンズ系により光学的に画像を取り扱う分野である。それに対し、Figure 6.1 に示すように、 x 、 y 座標軸をある周期 T で碁盤の目状に区切り、各交点の離散的な位置における濃度だけを対象とした画像を標本化画像という。また、画像の濃度値を、離散的な濃度値で表現したものを量子化画像という。一般にデジタルコンピュータで画像を取り扱う場合、すべて離散的な情報として処理する必要があるため、画像を標本化し、かつ量子化しなければならない。このような画像をデジタル画像という。一般に、標本化の際の周期 T は $T=1$ とおき、 x 、 y に対応する各整数値 X 、 Y の位置で画像を表現する。このような X 、 Y で指定された画像の最小の単位を画素という。元のアナログ信号に対して量子化を行う際、各画素に濃度の階調を与える。一般には、8 ビット、すなわち 256 段階の階調レベル数が使用されている。また、R(赤)、G(緑)、B(青)の三つのスペクトル帯域から得られたカラー階調画像を対象とした場合、各原色に対して 8 ビット、合計 24 ビット、すなわち約 1670 万色の色数となり、自然なカラー画像の表現が可能になる。

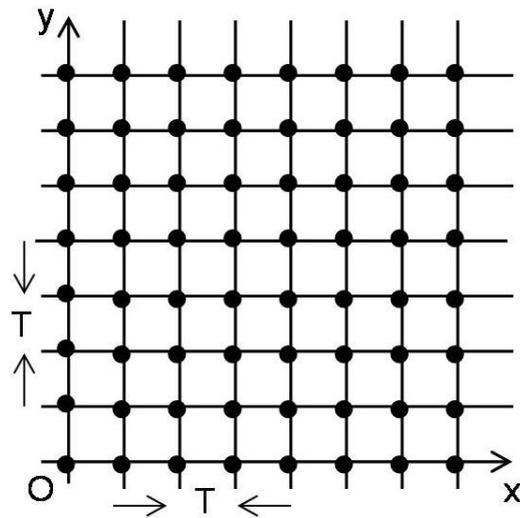


Figure 6.1 : Image Sampling

6.2.2 色空間[21][22]

色空間は座標軸系と部分空間から定義され、各色は色空間内の一つの点として表現される。たとえ同じデータ配列を共有していても、色空間を共有していなければ同じ画像を共有していることにはならない。

色空間には RGB 空間以外にもさまざまなものが存在する。広く利用されている色空間の間では相互変換の手段が与えられているので、それらの間を往来できる。以下に RGB 空間、YIQ 空間について述べる。

・ RGB 空間[21][22]

色光にかかわる 3 つの刺激値による表現される。R₀、G₀、B₀を原刺激(色)とし、各原刺激の大きさをR、G、Bとすると、任意の色Sは

$$S = RR_0 + GG_0 + BB_0 \quad (6.1)$$

と表現できる。すなわち、R₀、G₀、B₀の 3 色をR、G、Bの重みで混色することにより、任意のSを等色することができる。このような考え方に基づく色彩表現がRGB表色系である。

・ YIQ 空間[21][22]

YIQ 空間は、輝度信号 Y と 2 つの色差(人間に知覚される色の違い)成分 I、Q で色を表現する。輝度成分 Y はモノクロ映像を与え、2 つの色差信号 I、Q がカラー化に足りない色度情報を補う。アメリカや、日本における標準テレビジョン方式である NTSC 方式で用いられている。

Y、I、Q と R、G、B とは以下の関係にある。

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

6.2.3 近傍処理[20][21][22]

近傍処理は空間領域の処理であり、画像のノイズ除去やエッジ抽出など、画質の調整や強調に用いられる。単純な処理だが、符号化やパターン認識の前処理・特徴量抽出、人工的効果など、その応用範囲は幅広い。

Figure 6.2 に 3×3 のフィルタを用いた画像 $x[n_0, n_1]$ に対する近傍処理の様子を示す。近傍処理では、各画素とその近傍画素を用いて出力画像 $y[n_0, n_1]$ の画素値を計算する。この変換を T とすると、出力画像と入力画像は、以下のように関係付けられる。

$$y[n_0, n_1] = T\{x[n_0, n_1]\} \quad (6.3)$$

今、Figure 6.2 に示すように、ある位置 $x[n_{0c}, n_{1c}]$ に注目する。式(6.3)は、出力画像の画素 $y[n_{0c}, n_{1c}]$ が、 $x[n_{0c}, n_{1c}]$ とその近傍の画素値の処理から求められることを意味する。この処理をすべての画素に対して行い、出力画像を得る。

画素処理が、着目する画素の値 x のみで出力値 y を決定したのに対して、近傍処理は、出力値 $y[n_{0c}, n_{1c}]$ を着目する画素 $x[n_{0c}, n_{1c}]$ とその周辺の画素値で決定する。フィルタの大きさとして、 3×3 以外を選択することも可能である。 1×1 のフィルタを選択する場合は、画素処理そのものに相当する。また、時間軸や色空間も考慮したより高次元のフィルタも存在する。

鮮鋭化フィルタは、画像の詳細部の抽出や強調のために利用されている。本研究では、以下に示すさまざまな鮮鋭化フィルタによる画像処理により、衝撃波の抽出を行う。

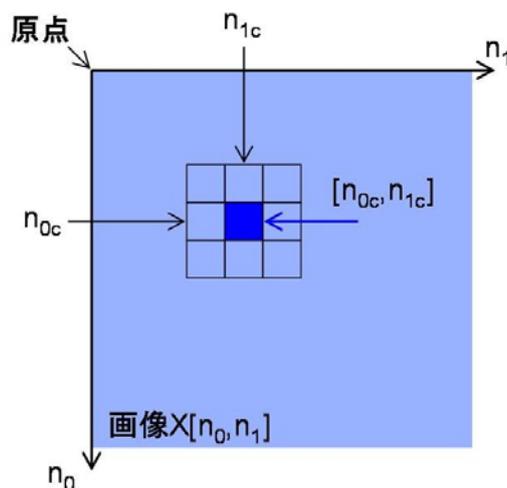


Figure 6.2 : Neighborhood Processing

・ラプラシアンフィルタ [22]

ラプラシアンフィルタは、2次元の2次微分操作

$$\nabla^2 x(p_0, p_1) = \frac{\partial^2 x}{\partial p_0^2} + \frac{\partial^2 x}{\partial p_1^2} \quad (6.4)$$

を意味しており、2次差分演算

$$\frac{\partial^2 x}{\partial n^2} \cong x[n+1] - 2x[n] + x[n-1] \quad (6.5)$$

による近似を利用している。微分とはいっても変数が離散であるため、数学的な意味は持たない。ただし、以下の点で2次微分に類似している。

- ・一定区間で出力がゼロ
- ・ステップ/ランプの始点・終点で出力がゼロでない
- ・ランプに沿って出力がゼロ

Figure 6.2 にラプラシアンフィルタの例を示す。Figure 6.3 (a)は、1次元の2次微分を水平垂直に適用した4近傍ラプラシアンフィルタであり、Figure 6.3 (b)は、さらに対角方向も考慮した8近傍ラプラシアンフィルタである。

0	1	0	1	1	1
1	-4	1	1	-8	1
0	1	0	1	1	1

Figure 6.3 : Laplacian Filter (Left : (a)4 neighborhood, Right : (b)8 neighborhood)

これらを以下に示す加重移動平均操作により処理を行う。

$$y[n_0, n_1] = T\{x[n_0, n_1]\} = \sum_{k_0=K_T}^{K_B} \sum_{k_1=K_L}^{K_R} w[k_0, k_1] x[n_0 + k_0, n_1 + k_1] \quad (6.6)$$

ここで、 $w[k_0, k_1]$ は各画素にかかる重み係数(Figure 6.2 (a)、(b)のようなラプラシアンフィルタ)であり、 K_T 、 K_B 、 K_L 、 K_R は、それぞれ近傍処理の上、下、左、右の範囲を示している(Figure 6.3(a)、(b)のような3×3フィルタの場合、 $K_T=-1$ 、 $K_B=1$ 、 $K_L=-1$ 、 $K_R=1$)。

・ラプラシアンガウシアンフィルタ [20][21][22]

このフィルタの特徴は、雑音を抑制するためのガウス平滑化フィルタと、エッジ検出を行うラプラシアンフィルタを同時にかけることができることである。平均値0、標準偏差 σ

の2次元の等方的なガウス関数は以下のようになる。

$$g_{\sigma}(p_0, p_1) \equiv \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left\{-\frac{p_0^2 + p_1^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (6.7)$$

この式のラプラシアンを計算すると、以下のようになる。

$$\nabla^2 g_{\sigma}(p_0, p_1) = \frac{p_0^2 + p_1^2 - 2\sigma^2}{2\pi\sigma^6} \exp\left\{-\frac{p_0^2 + p_1^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (6.8)$$

これを $w[k_0, k_1]$ とし、式(6.6)の加重移動平均操作により処理を行う。

Figure 6.4 に式(6.8)の $\nabla^2 g_{\sigma}(p_0, p_1)$ の関数の断面を示す。この関数は、ガウス関数の広がりを表す標準偏差 σ がパラメータとして含まれており、 σ の値を変えることにより平滑化の度合い、あるいは画像の解像度を調節することができる。すなわち、 σ を大きくして平滑化し、解像度を落とした画像を作ることにより、雑音に影響されることなく画像の大局的な構造を表すエッジが抽出できる。一方、小さな σ を用いることによって対象物の詳細な形状を表すエッジが抽出できる。本研究では $\sigma = \sqrt{2}$ とした。

注意点としては、フィルタの大きさを σ に比べて十分大きくとらないとガウス関数のよい近似にはならないことである。フィルタの影響の及ぶ範囲は、およそ $2\pi\sigma$ ($\pm\pi\sigma$ の内部に99%の領域が含まれる)である。本研究では、フィルタの大きさを $(2 \times 3\sqrt{2}\sigma + 1) \times (2 \times 3\sqrt{2}\sigma + 1)$ (小数点以下は四捨五入)としている。

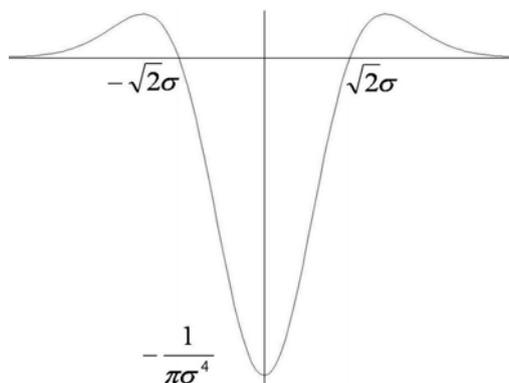


Figure 6.4 : Cross section of Laplacian-Gaussian Filter

・勾配フィルタ[21]

勾配フィルタの例として、Figure 6.5 にソーベルフィルタを示す。このフィルタは、大きさが決められた近傍領域を用いて、雑音に対して強い、勾配の方向が正しいなど、より正確に x, y 方向の偏微分を計算するための方法として、Sobelにより考案されたものである。ソーベルフィルタは、近傍領域内の濃度の和を求める際に、上下左右の画素に対角線上のものより大きな重みを与えている。このフィルタに対し、式(6.6)で示した加重移動平均操作を行い、近傍処理を行う。

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

Figure 6.5 : Sobel Filter (Left : (a)x direction, Right : (b)y direction)

6.3 画像処理

ここでは、画像処理した結果および考察について述べる。

6.3.1 原画像

Figure 6.6 に画像処理を行う原画像を示す。この画像は、Figure 5.18 で示した高さが 10mm のボディフラップを設置した極超音速飛行体周りに生じた衝撃波の可視化結果と同様で、画像サイズは横 1600 ピクセル、縦 1200 ピクセル、合計 1920000 ピクセルである。なお、本研究で扱う画像データは R、G、B の 3 つの原色のそれぞれについて 8 ビット(256 段階の階調レベル)、すなわち合計 24 ビットである。

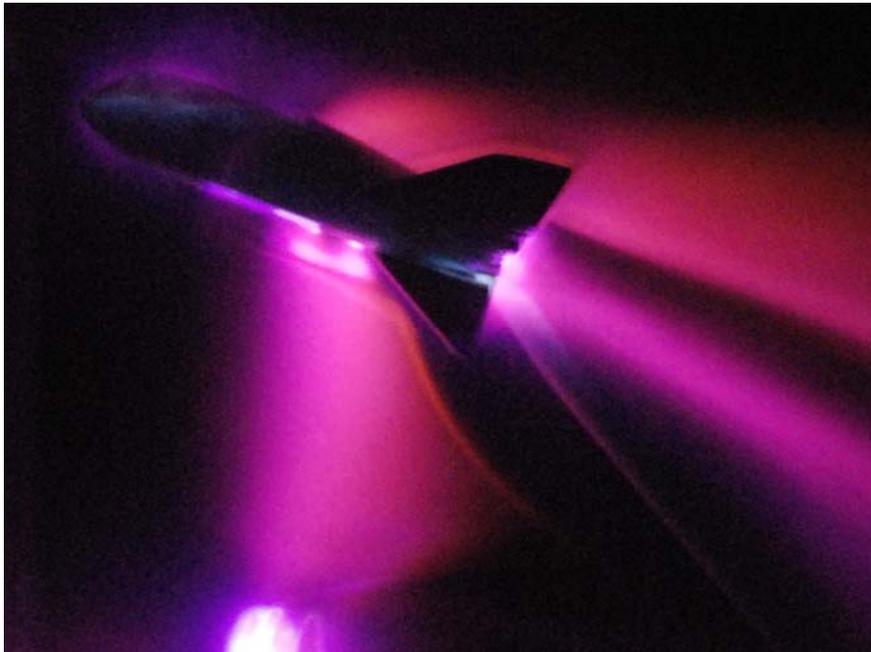


Figure 6.6 : Original Image

6.3.2 色空間に関する考察

色空間の違いを比較するために、Figure 6.6 の原画像の R、G、B 値を取得し、またそこから式(6.2)より Y、I、Q 値を計算し、それぞれの値に対する強度分布画像を Figure 6.7～Figure 6.12 に示す。

Figure 6.7～Figure 6.9 の RGB のそれぞれの画像について、強度分布にムラはあるがいずれも特に値が小さい領域(画像左、右上、右下など)、大きい領域(画像下の針状電極付近、模型下部)はおおむね一致している。これは、R、G、B という 3 つの色光にかかわる刺激値により、色を作り出す加法混色(互いに波長の異なる光(色光)を重ね合わせて別の色を作ること)のためであると考えられ、原画像とも対応している。この 3 つの画像で、強度値が大きい領域が最も大きいのは R であり、次いで B、G の順になっている。

Figure 6.10～Figure 6.12 の YIQ の画像について、Y の強度分布は原画像から色を取り除き白黒にした輝度画像であるのに対し、I や Q は RGB 画像で強度値が特に大きい領域(画像下の針状電極付近、模型下部)は逆に強度値が小さく、全体として強度値が特に大きいという部分はなく、ぼやけた感じの画像になっている。

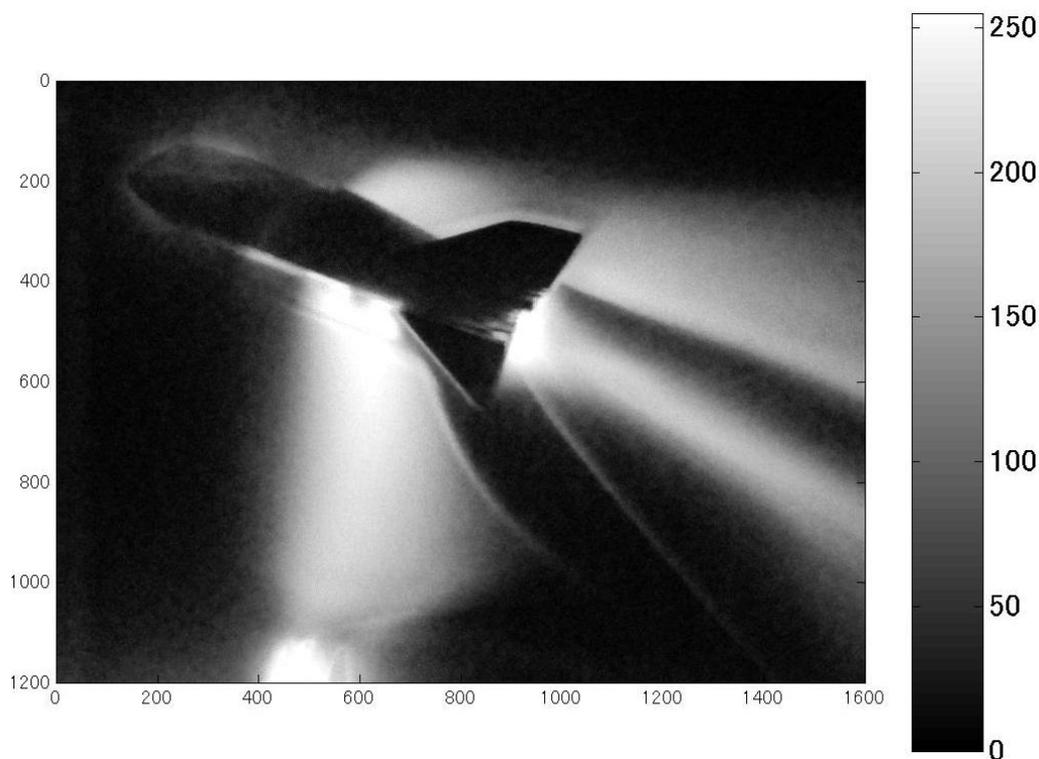


Figure 6.7 : Intensity Image [R]

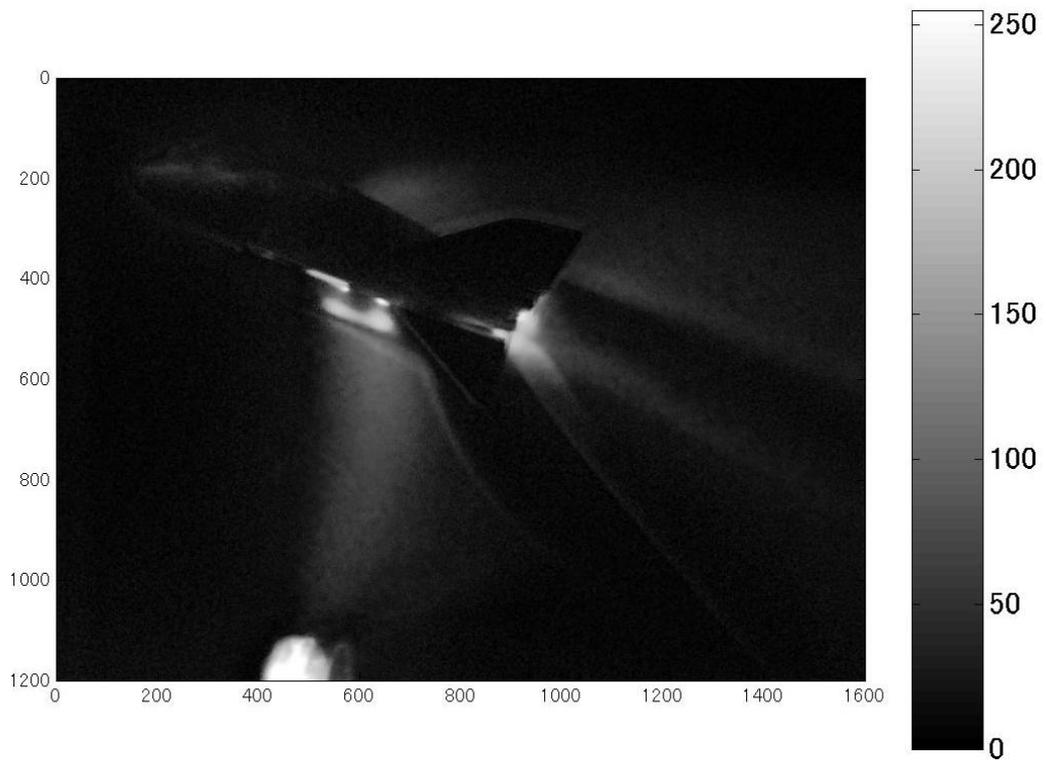


Figure 6.8 : Intensity Image [G]

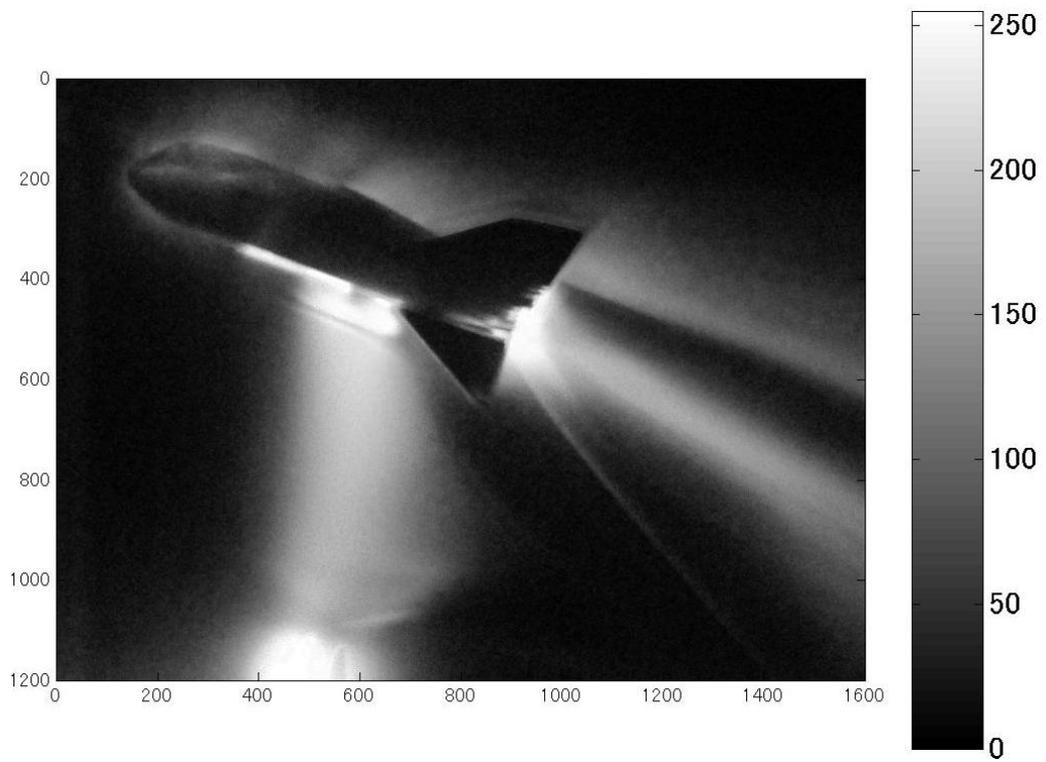


Figure 6.9 : Intensity Image [B]

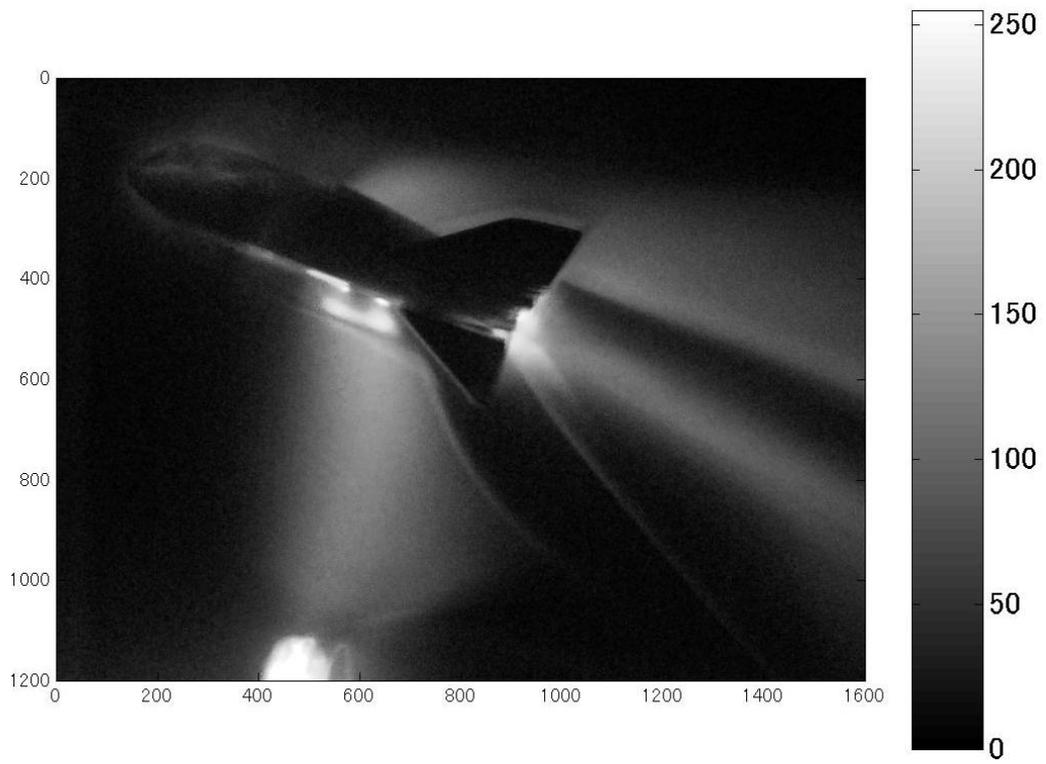


Figure 6.10 : Intensity Image [Y]

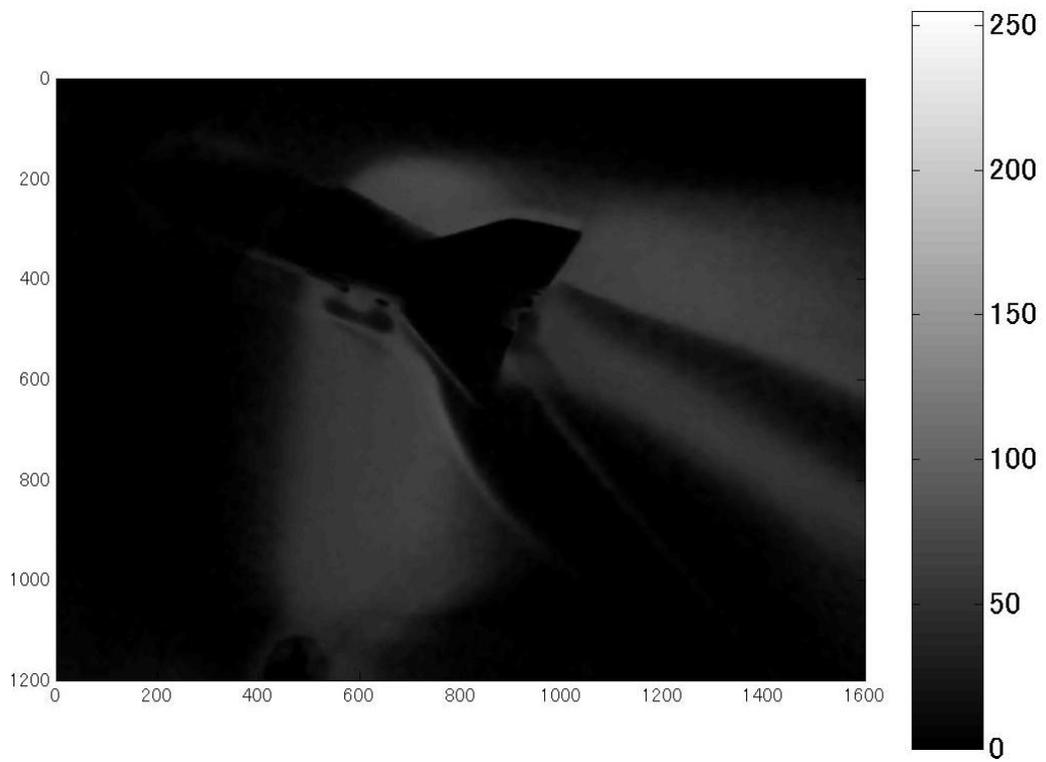


Figure 6.11 : Intensity Image [I]

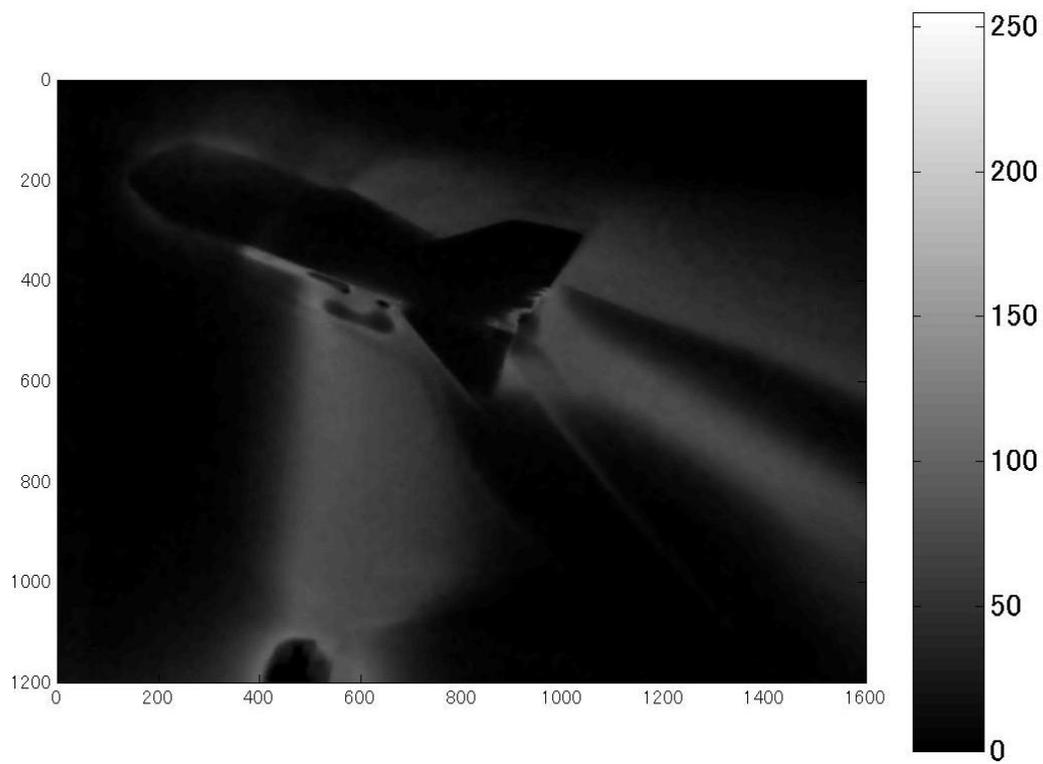


Figure 6.12 : Intensity Image [Q]

6.3.3 各フィルタに関する考察

各フィルタによる近傍処理の違いを調べるために、Figure 6.6 の原画像の Y 値の強度分布図、すなわち Figure 6.10 に対し、6.2.3 で述べたラプラシアンフィルタ(4 方向、8 方向)、ラプラシアンガウシアンフィルタ、ソーベルフィルタ(x 方向、y 方向)、それぞれを適用し画像処理を行った。その結果を Figure 6.13~Figure 6.18 に示し、それぞれに対して考察を行う。なお、いずれの結果もカラーバーに関する設定は、コンピュータの自動設定となっている。

・ラプラシアンフィルタ(4 近傍)

Figure 6.13 に 4 近傍ラプラシアンフィルタを用いて画像処理を行った画像を示す。この画像を他の画像と同様にコンピュータにより自動保存したところ、チェッカーフラッグのような縞模様が出てしまったので、パソコンのプリントスクリーン機能を用いて同様の画像を保存した結果を Figure 6.14 に示す。この場合、Figure 6.13 のような縞模様は出ていないことが分かる。

Figure 6.13 について、うっすらと模型や針状電極の輪郭が捉えられているが、全体的に点が散乱していることが分かる。また、Figure 6.14 の場合は、模型や針状電極の輪郭がほとんどわからない。いずれの結果からもはっきりとした境界が得られず、ノイズの影響が大きいと考えられる。

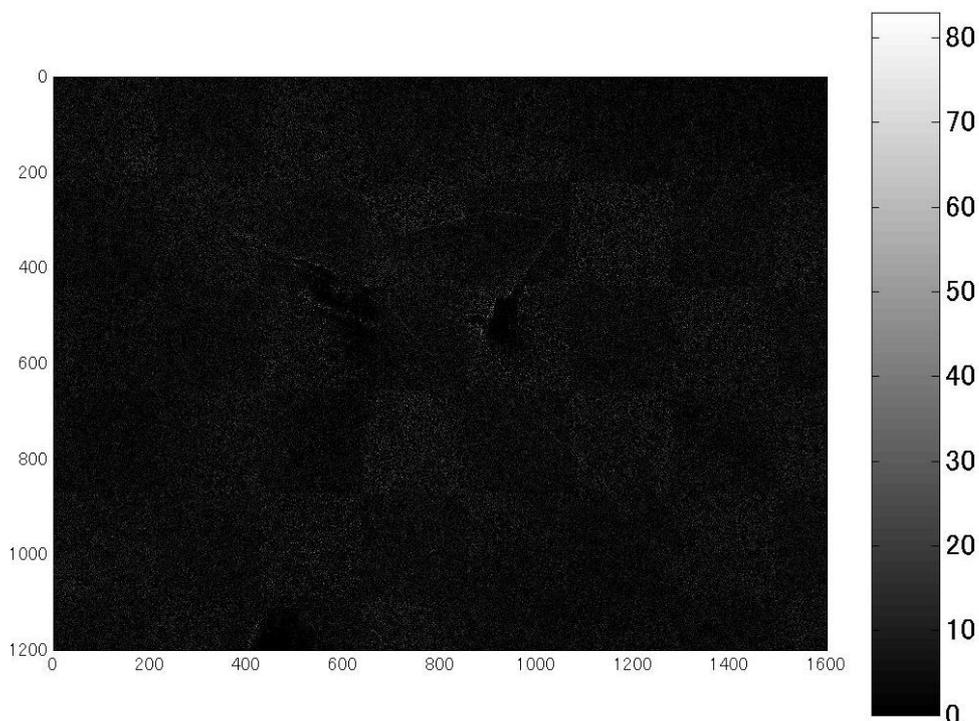


Figure 6.13 : Intensity Image (Laplacian Filter (4 neighborhood))

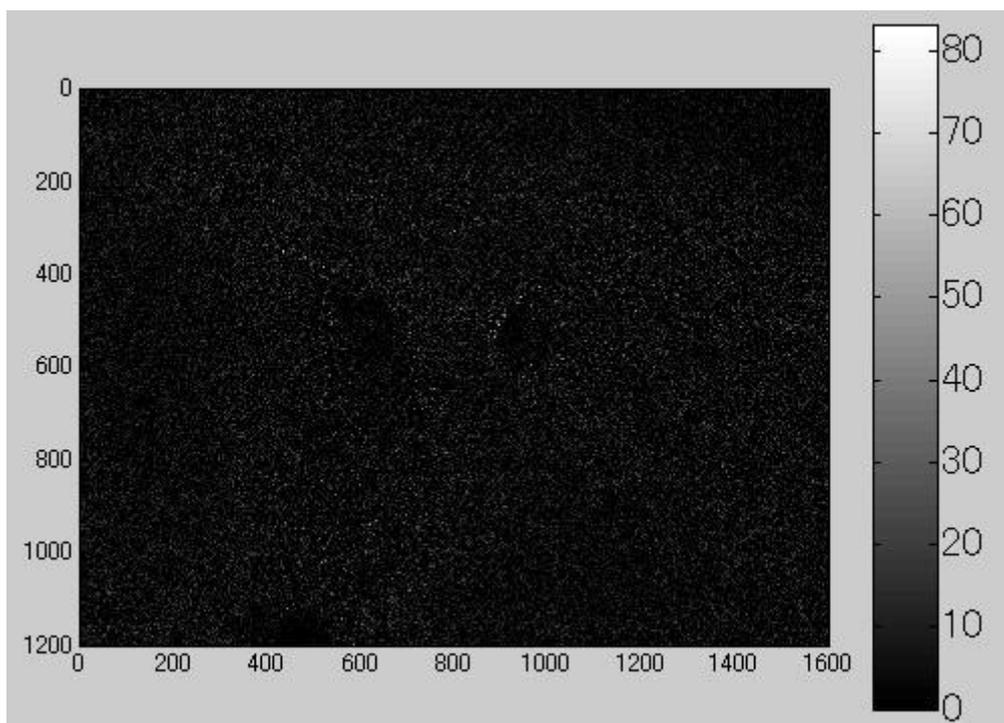


Figure 6.14 : Intensity Image (Laplacian Filter (4 neighborhood) : Print Screen)

・ラプラシアンフィルタ(8近傍)

Figure 6.15 に 8 近傍ラプラシアンフィルタを用いて画像処理を行った画像を示す。この画像は Figure 6.13 と同様に、チェッカーフラッグのような縞模様が出てしまったので、パソコンのプリントスクリーン機能を用いて同様の画像を保存した結果を Figure 6.16 に示す。この場合、Figure 6.15 のような縞模様は出ていないことがわかる。

Figure 6.15 について、Figure 6.13 と同様に、うっすらと模型や針状電極の輪郭が捉えられているが、全体的に点が散乱していることが分かる。また、Figure 6.16 の場合も、Figure 6.14 と同様に、模型や針状電極の輪郭がほとんどわからない。いずれも 4 近傍ラプラシアンフィルタよりもはっきりとしているものの、やはりノイズの影響が大きく、はっきりとした境界が得られていない。処理後の各点の出力値は、Figure 6.3 のフィルタ、および自動設定になっているカラーバーの最大値が 4 近傍ラプラシアンフィルタの場合と比べおよそ 2 倍になっていることから、全体的に 4 近傍ラプラシアンフィルタの場合のおよそ 2 倍になっていると思われる。

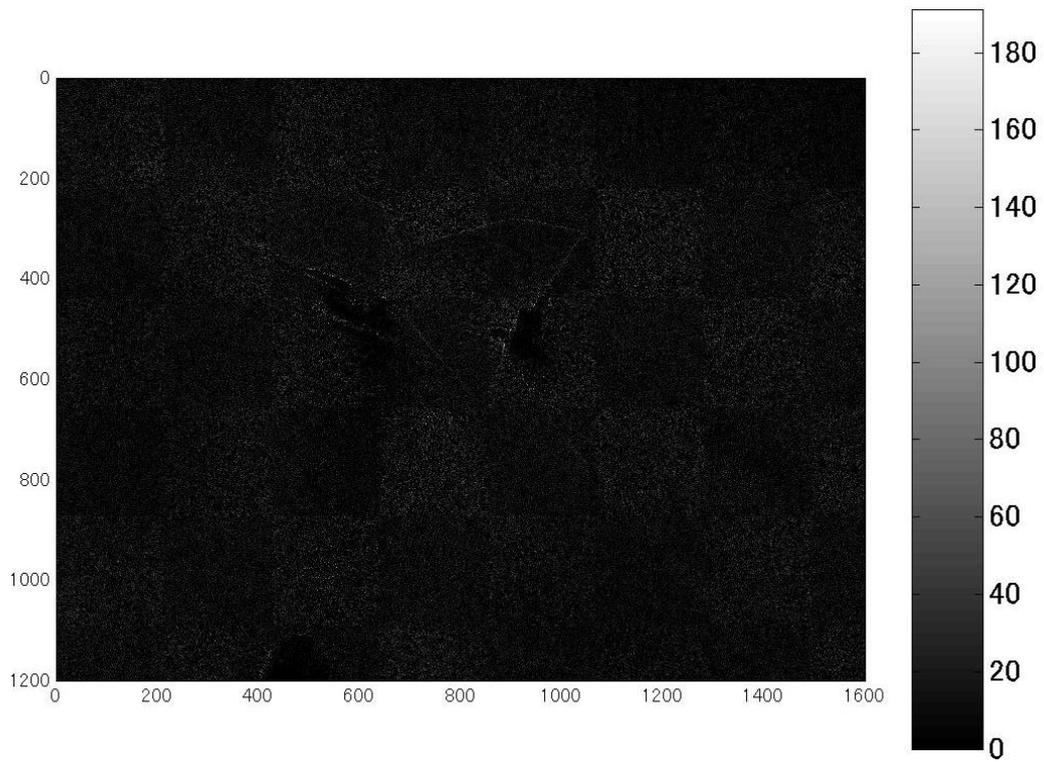


Figure 6.15 : Intensity Image (Laplacian Filter (8 neighborhood))

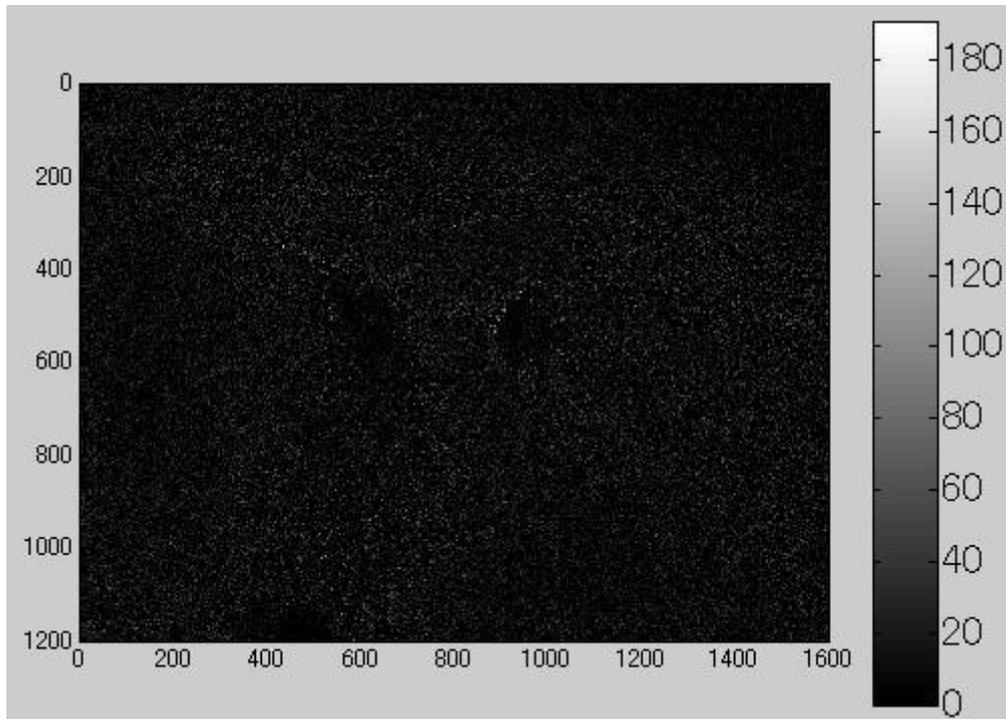


Figure 6.16 : Intensity Image (Laplacian Filter (8 neighborhood)) : Print Screen

・ラプラシアンガウシアンフィルタ

Figure 6.17 にラプラシアンガウシアンフィルタを用いて画像処理を行った結果を示す。

ラプラシアンフィルタやソーベルフィルタに比べノイズの出力値が小さく、模型や針状電極の輪郭が分かる程度に出力されている。衝撃波の部分もうっすら分かる程度である。カラーバーの最大値が、4 近傍ラプラシアンフィルタに比べ 7 分の 1、8 近傍ラプラシアンフィルタに比べ 15 分の 1 であり、全体的に各点での出力値が小さいと考えられる。カラーバーの範囲を適切な範囲に変更することや、例えばフィルタ全体を 100 倍するなど、より変化量が大きくなるようなフィルタを作り処理すること(ただしこの場合、もはやラプラシアンガウシアンフィルタとは異なる)などにより、よりはっきりとした境界が得られる可能性がある。

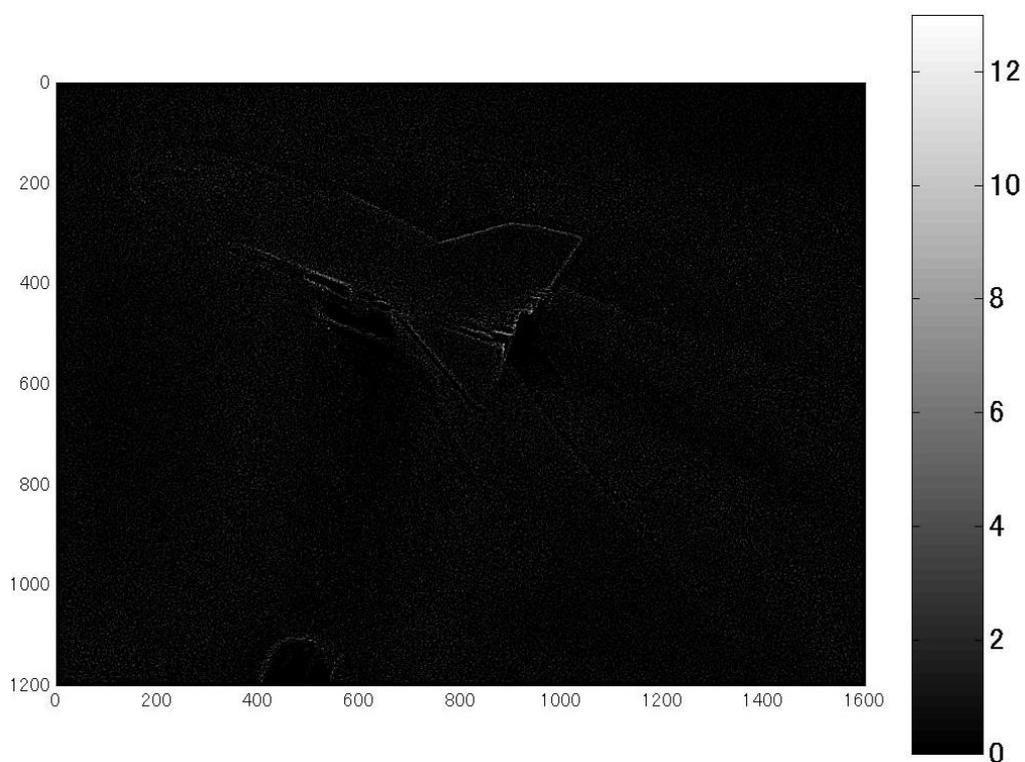


Figure 6.17 : Intensity Image (Laplacian-Gaussian Filter)

・ソーベルフィルタ(x 方向)

Figure 6.18 に x 方向に感度があるソーベルフィルタを用いて画像処理を行った結果を示す。ソーベルフィルタは、等方性のあるラプラシアンフィルタ、ラプラシアンガウシアンフィルタとは異なり、ある方向に対しての勾配(偏微分)を、重み付けをして計算するフィルタである。

Figure 6.18 のボディフラップ下方の衝撃波などに注目すると、x 方向(画像の左右方向)に対しての感度に鋭敏であることがわかる。ノイズもラプラシアンガウシアンフィルタほどではないが、それほど大きくない。カラーバーの最大値は、最大の 255 になっているので、出力値の小さいところと大きいところではっきりとした差があると考えられる。

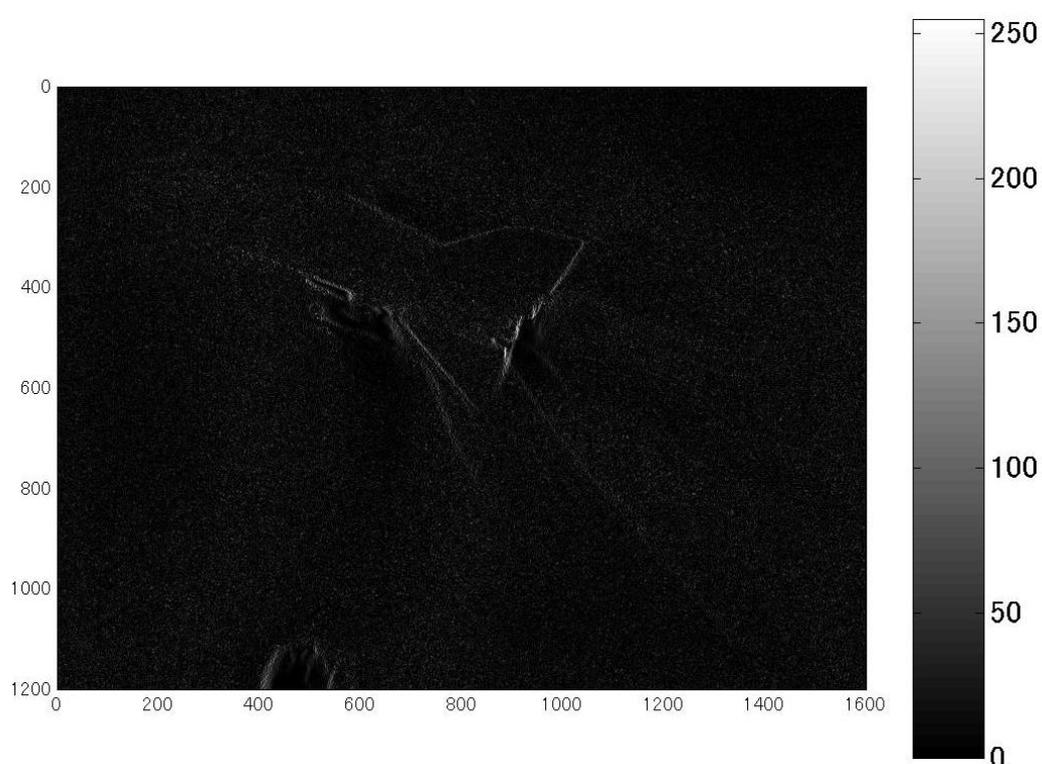


Figure 6.18 : Intensity Image (Sobel Filter (x direction))

・ソーベルフィルタ(y方向)

Figure 6.19 に y 方向に感度があるソーベルフィルタを用いて画像処理を行った結果を示す。

Figure 6.19 の模型上部、下部の輪郭や模型下方の衝撃波などに注目すると、y 方向(画像の上下方向)に対しての感度に鋭敏であることがわかる。その他、ノイズやカラーバーに関しては、x 方向に感度があるソーベルフィルタと同様である。x 方向や y 方向に感度があるソーベルフィルタだけでなく、斜め方向に感度のあるフィルタも使い、それらから得られた各点の数値を重ね合わせるにより、さまざまな方向に感度がある、よりはっきりとした境界が得られる可能性がある。

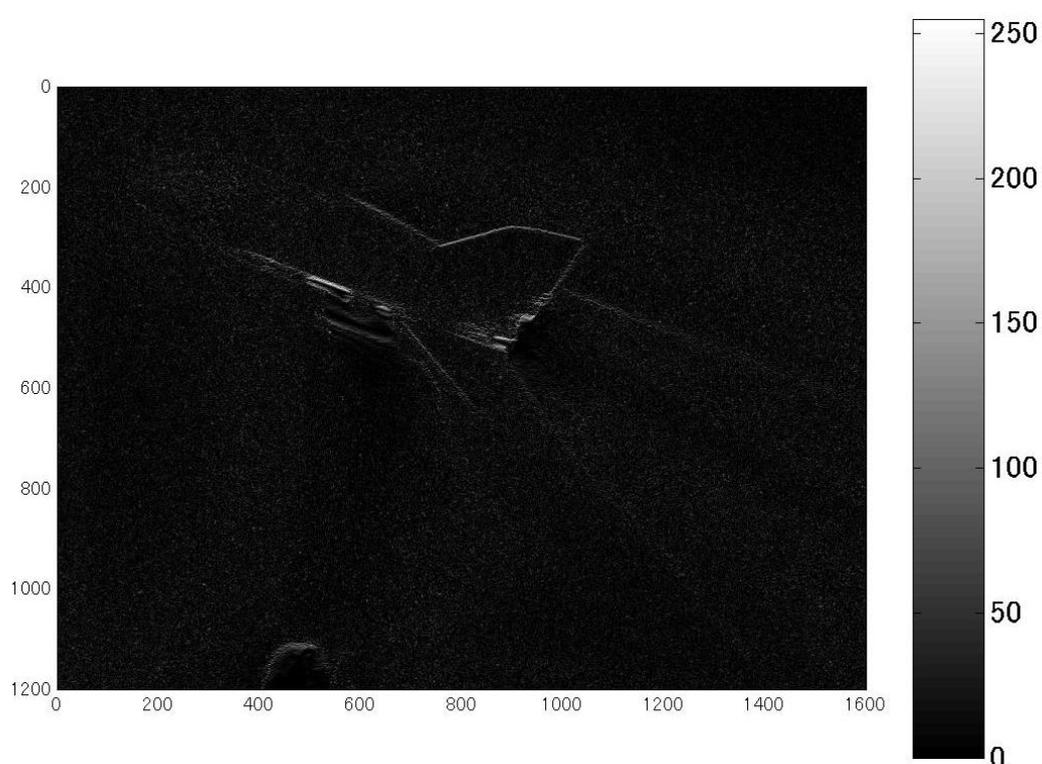


Figure 6.19 : Intensity Image (Sobel Filter (y direction))

6.3.4 フィルタ処理の回数に関する考察

フィルタ処理した画像にさらにフィルタ処理を行うとどういった変化が現れるのかということ調べるために、Figure 6.6 の原画像の Y 値の強度分布図、すなわち Figure 6.10 に対し、ラプラシアンガウシアンフィルタ、ソーベルフィルタ(y 方向)の 2 種類を複数回適用する画像処理を行った。その結果を Figure 6.20~Figure 6.23 に示し、それぞれに対して考察を行う。なお、いずれの結果もカラーバーに関する設定は、コンピュータの自動設定となっている。

・ラプラシアンガウシアンフィルタ

Figure 6.20 にラプラシアンガウシアンフィルタを用いて 2 回処理を行った結果を、Figure 6.21 に 3 回処理を行った結果を示す。

Figure 6.20 は、処理が 1 回のみ Figure 6.17 と比較してノイズが増えていることが分かる。Figure 6.21 は、処理が 1 回、2 回の場合と比較してノイズが減っているが、同時に模様境界もあいまいになっていることが分かる。

いずれの結果も、ガウス分布による平滑化の影響により、出力が大きかった点が相対的に小さく、出力が小さかった点が相対的に大きくなったことが原因だと考えられる。これは、カラーバーの最大値が処理を減るごとに小さくなっていることから合理的であると思われる。

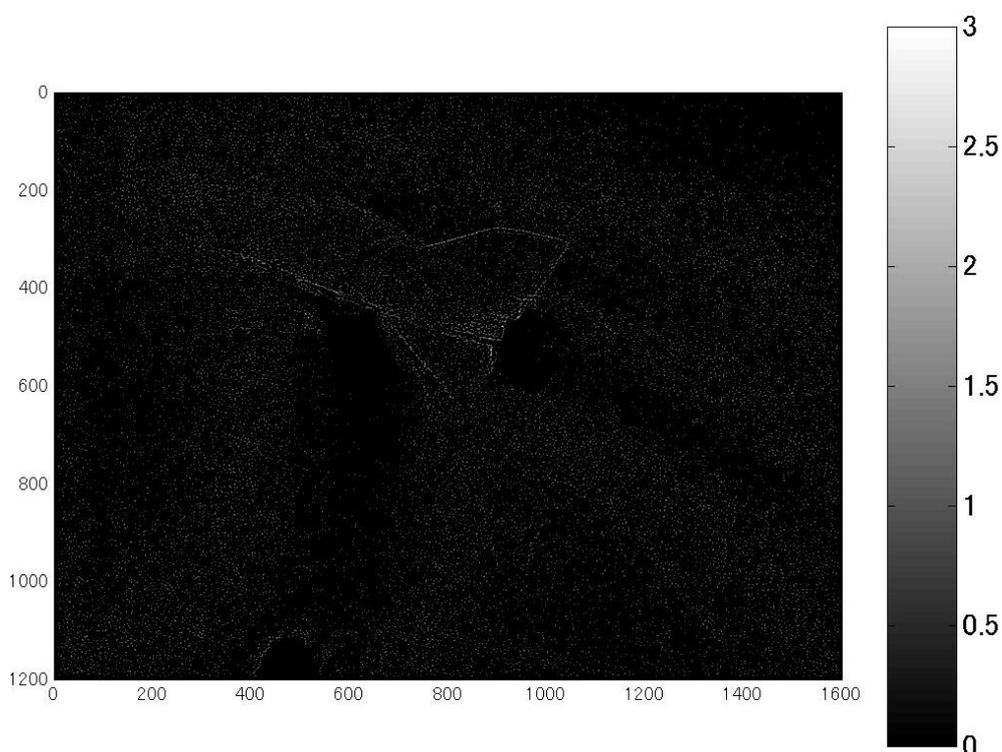


Figure 6.20 : Intensity Image (Laplacian-Gaussian Filter : Second Processing)

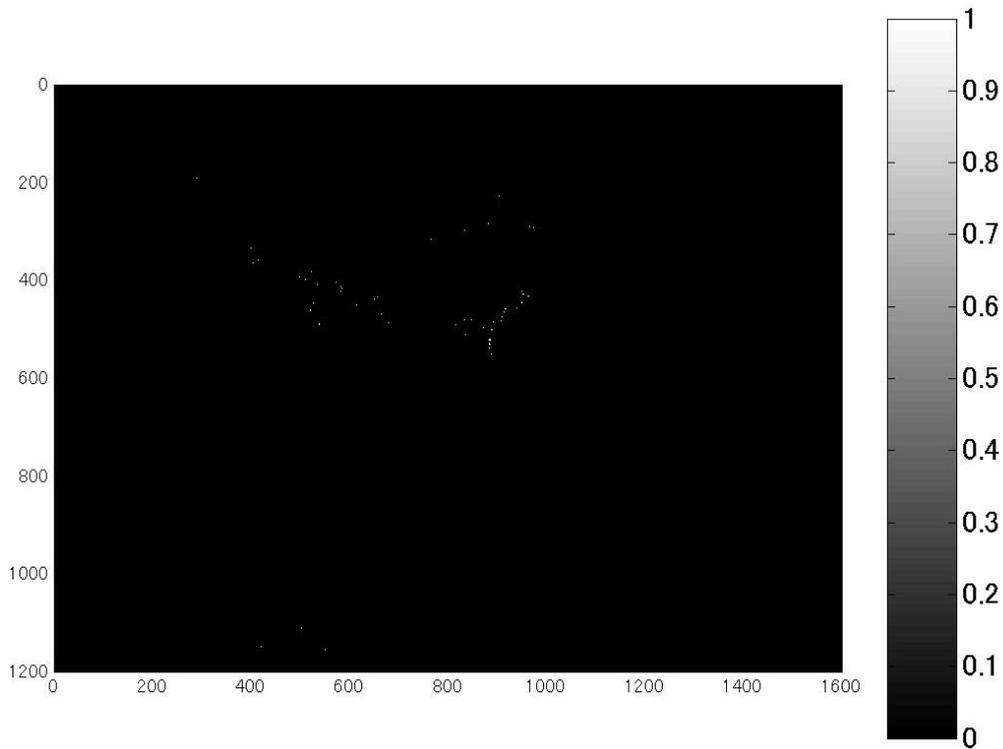


Figure 6.21 : Intensity Image (Laplacian-Gaussian Filter : Third Processing)

・ソーベルフィルタ(y 方向)

Figure 6.22 に y 方向に感度があるソーベルフィルタを用いて 2 回処理を行った結果を、Figure 6.23 に 3 回処理を行った結果を示す。

Figure 6.22 は、処理が 1 回のみ Figure 6.17 と比較してノイズが増えていることが分かる。Figure 6.23 は、処理が 1 回、2 回の場合と比較してさらにノイズが増え、模型境界がさらにあいまいになっていることがわかる。

いずれの結果も、周囲の点の影響で出力が増加したためであると考えられる。1 回目の処理後、何の処理も行わず 2 回目の処理を行うのはノイズを大きくするのみであり、有効ではないことが分かった。

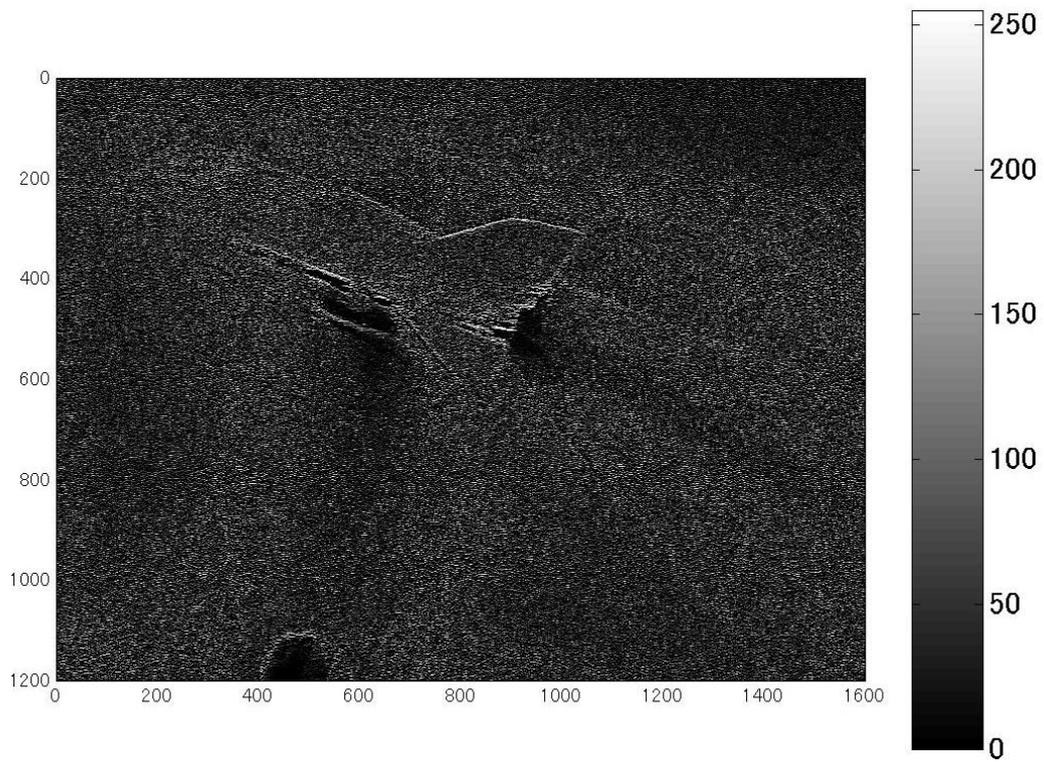


Figure 6.22 : Intensity Image (Sobel Filter (y direction) : Second Processing)

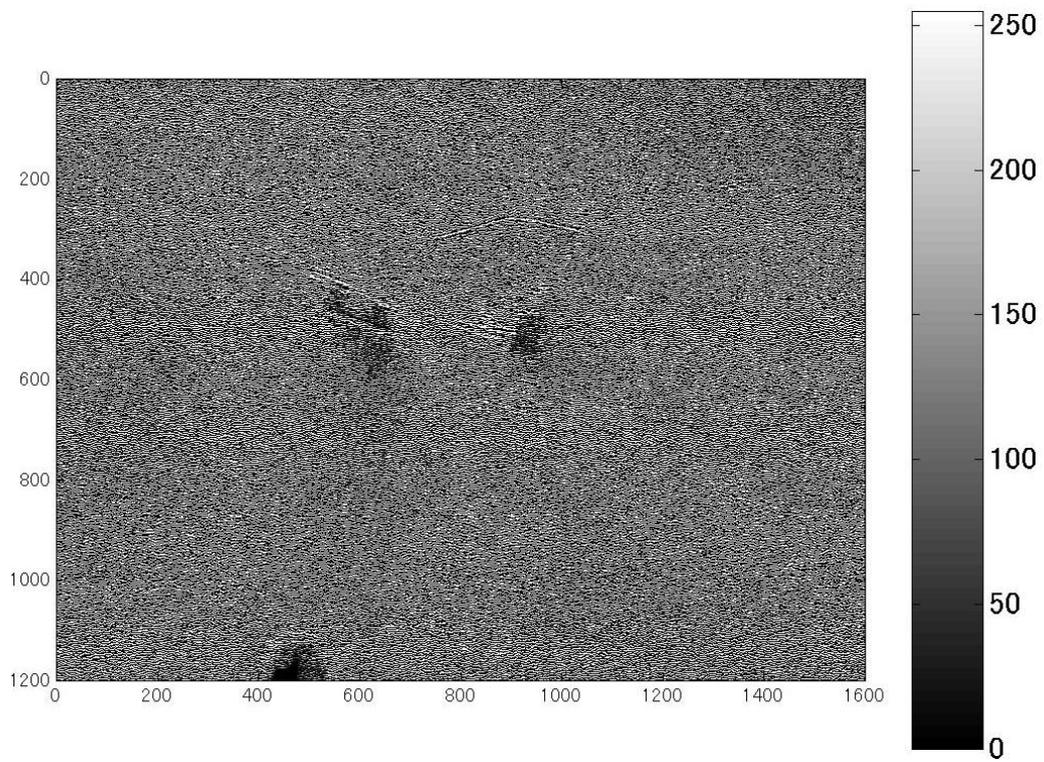


Figure 6.23 : Intensity Image (Sobel Filter (y direction) : Third Processing)

6.3.5 改良したラプラシアンガウシアンフィルタに関する考察

6.3.3 のラプラシアンガウシアンフィルタに関する考察で、フィルタ全体を数倍し、より変化量が大きくなるようなフィルタを作ることなどを考案した。そこで、フィルタ全体を数倍するという改良をしたラプラシアンガウシアンフィルタを適用する画像処理を行った。その結果を Figure 6.24、Figure 6.25 に示し、それぞれに対して考察を行う。なお、いずれの結果もカラーバーに関する設定は、コンピュータの自動設定となっている。

Figure 6.24 に全体を 10 倍したラプラシアンガウシアンフィルタを用いて画像処理を行った結果を、Figure 6.25 に全体を 100 倍したラプラシアンガウシアンフィルタを用いて画像処理を行った結果を示す。

Figure 6.24 は、等倍のラプラシアンガウシアンフィルタを適用した Figure 6.17 と比較して、カラーバーの最大値は 10 倍になったものの、全体として大きな変化は見られなかった。Figure 6.25 に関しては、等倍のラプラシアンガウシアンフィルタを適用した Figure 6.17 と比較して全体の出力が大きくなり、よりノイズが目立つようになったが、同時に模型境界だけでなく、本来の目的である離脱衝撃波を抽出することができるようになった。今回はフィルタ全体を 100 倍したが、この値をより細かく変化させることにより、よりはっきりと衝撃波が抽出できると考えられる。

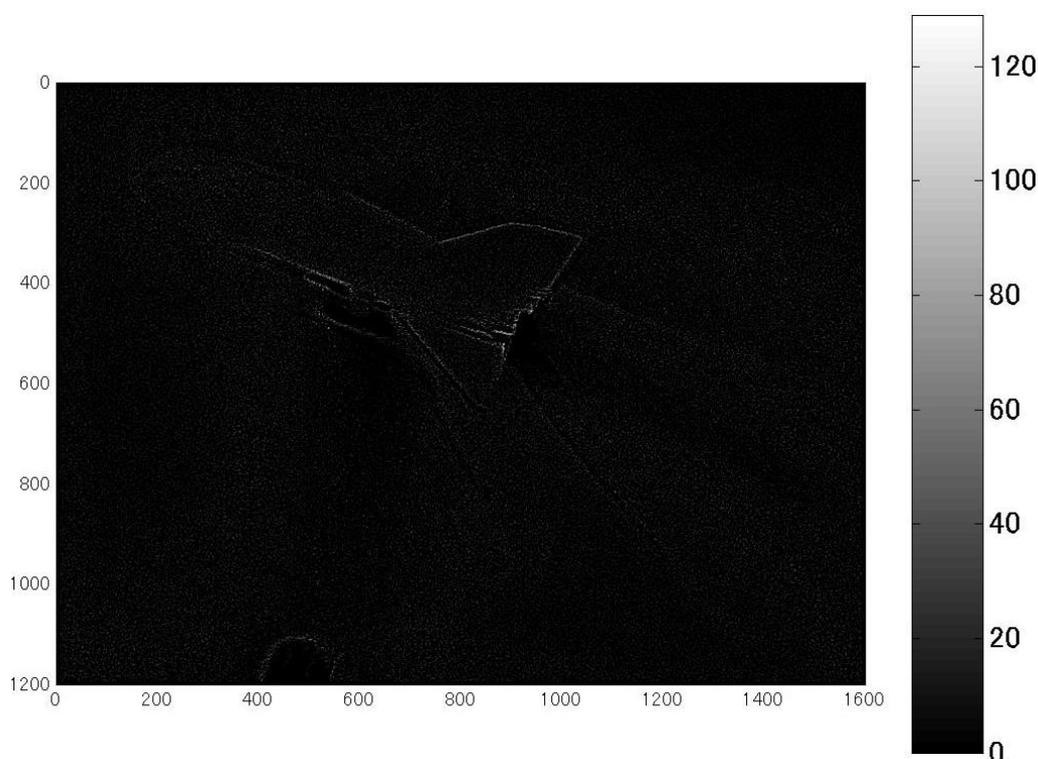


Figure 6.24 : Intensity Image (Laplacian-Gaussian Filter : $\times 10$)

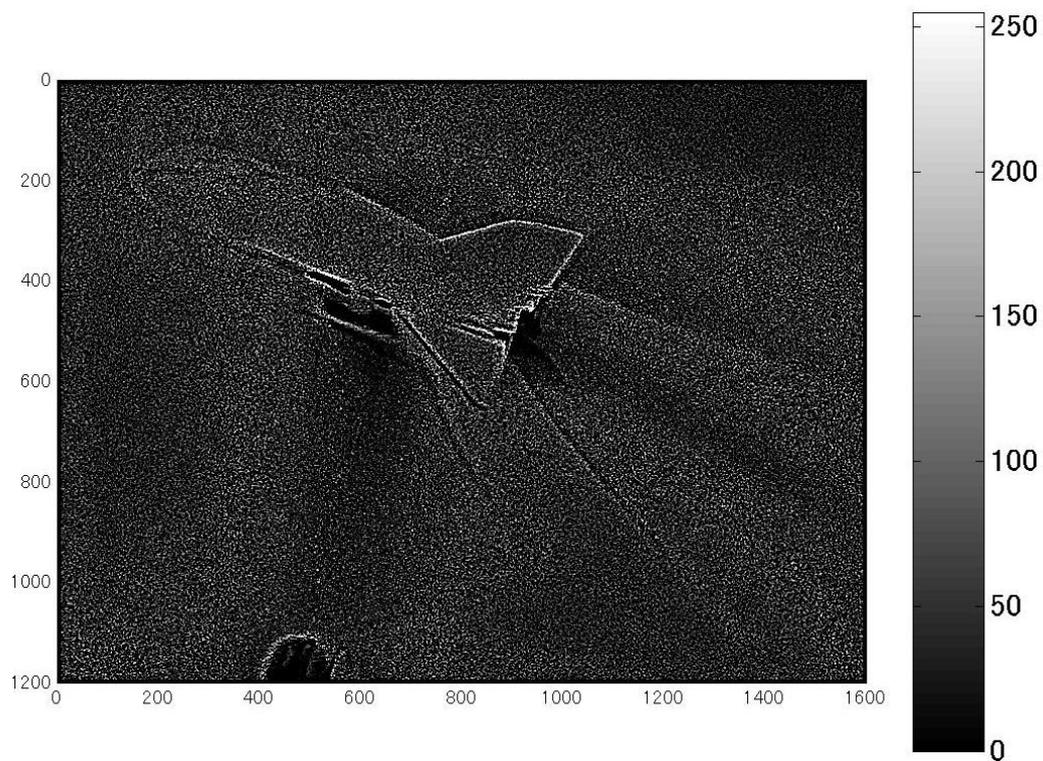


Figure 6.25 : Intensity Image (Laplacian-Gaussian Filter : $\times 100$)

6.3.6 ソーベルフィルタ近傍処理画像の重ね合わせに関する考察

6.3.3 のソーベルフィルタに関する考察で、 x 方向、 y 方向、斜め方向など複数方向に感度のあるフィルタを用いて画像処理を行い、その結果を重ね合わせを考察した。そこで、 x 方向、 y 方向に感度のあるソーベルフィルタ処理後の結果の重ね合わせを実際に行った。その結果を **Figure 6.26**、**Figure 6.27** に示し、考察を行う。なお、いずれの結果もカラーバーに関する設定は、コンピュータの自動設定となっている。

Figure 6.26 に x 方向に感度があるソーベルフィルタを用いて処理を行った結果と、 y 方向に感度があるソーベルフィルタを用いて処理を行った結果を重ね合わせた結果を、**Figure 6.27** に x 方向に感度があるソーベルフィルタを用いて処理を行った結果と、 y 方向に感度があるソーベルフィルタを用いて処理を行った結果のそれぞれの絶対値をとった後、重ね合わせた結果を示す。

Figure 6.26 は、重ね合わせを行った結果、全体的にぼけた印象の図になってしまった。これは、 x 方向に感度があるソーベルフィルタによる処理後、負の値が出力された点と、 y 方向に感度があるソーベルフィルタによる処理後、正の値が出力された点、もしくはその逆の組み合わせの点が重ね合わせにより、出力が相殺されて値が小さくなってしまったことが原因と考えられる。一方、**Figure 6.2** は、絶対値をとった後重ね合わせを行ったため、重ね合わせによるノイズは増加したものの、 x 方向に感度のあるソーベルフィルタにより検出された境界と、 y 方向に感度のあるソーベルフィルタにより検出された境界がうまく重ね合わさり、よりはっきりとした境界の画像が得られた。さらに斜め方向も加えるとよりはっきりした境界が得られるものと考えられる。しかし、あまり多くの画像を重ね合わせるとノイズも多く、また大きくなるため、必要最小限の重ねあわせにとどめるか、またはあるしきい値を決めてそれ以下の値をすべて 0 にするといったノイズ除去を行った後、重ね合わせを行うなど、何らかのノイズへ対策が必要だと考えられる。

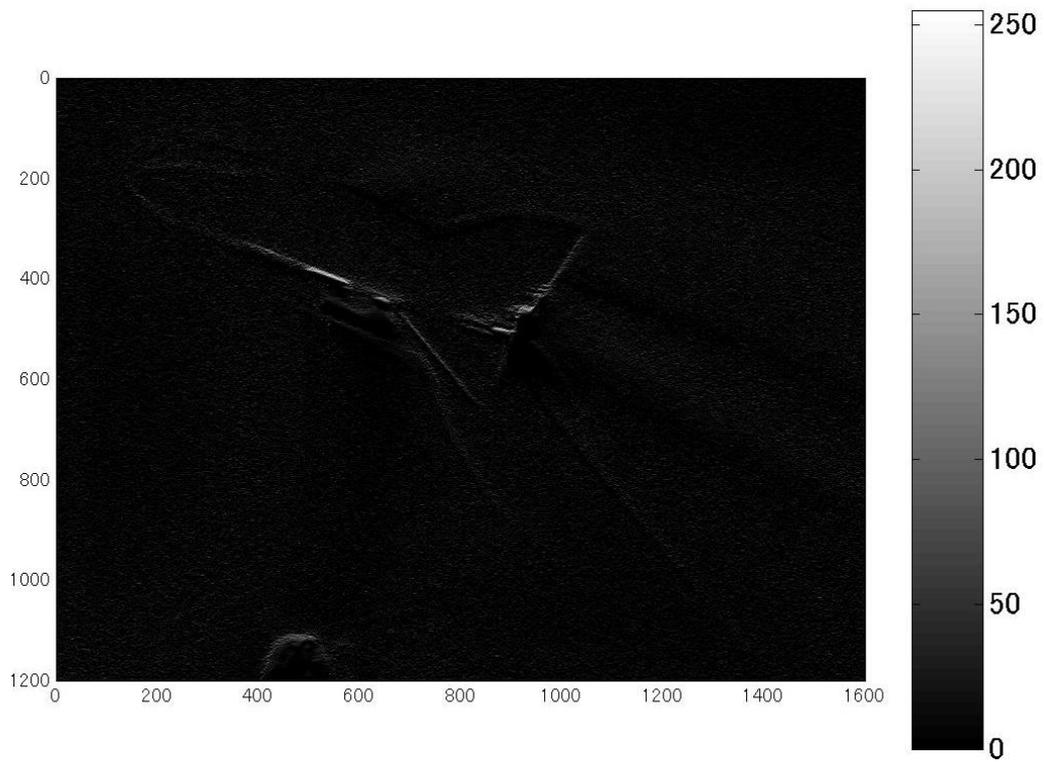


Figure 6.26 : Intensity Image (Sobel Filter (x direction + y direction))

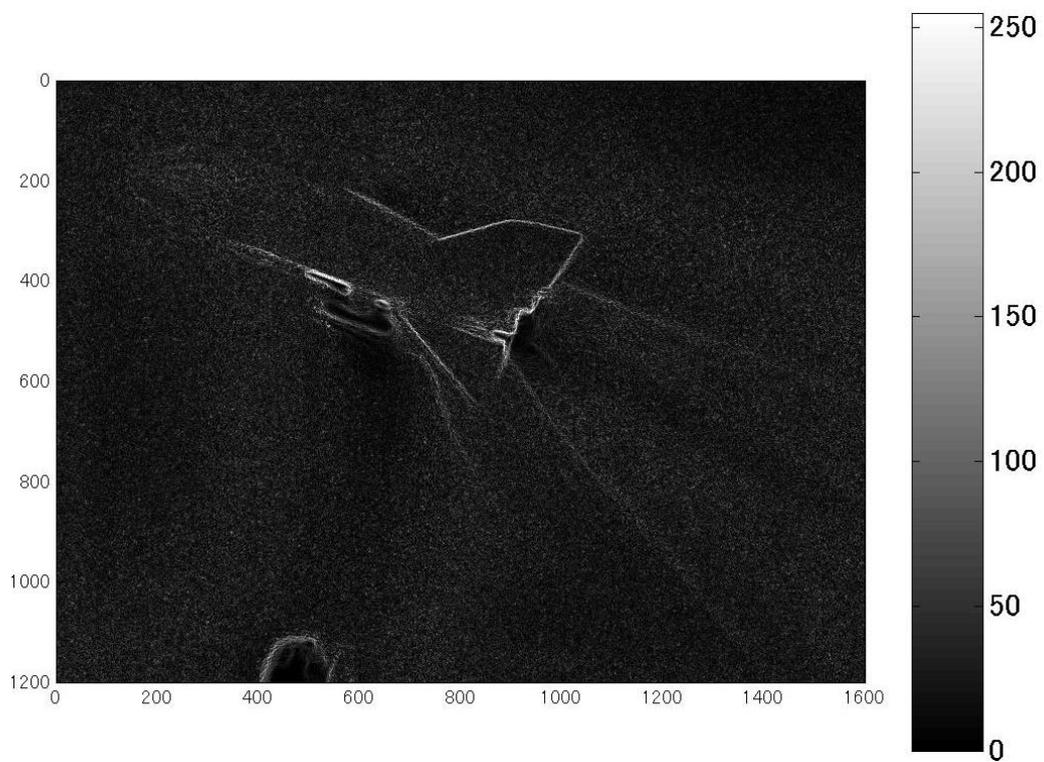


Figure 6.27 : Intensity Image (Sobel Filter (absolute(x direction) + absolute(y direction)))

6.3.7 色空間とフィルタによる近傍処理に関する考察

これまでのフィルタ処理は、原画像の輝度画像である Y 値への適用のみであった。そこで、RGB 値の中から代表して R 値、YIQ 値の中から色差成分である I 値に対してもフィルタ処理を行った。今回用いたフィルタは、これまでの結果で衝撃波抽出がうまくいったと思われるフィルタ全体を 100 倍したラプラシアンガウシアンフィルタ(フィルタ 1 とする)と、x 方向に感度があるソーベルフィルタを用いて処理を行った結果と、y 方向に感度があるソーベルフィルタを用いて処理を行った結果のそれぞれの絶対値をとった後、重ね合わせた結果(フィルタ 2 とする)である。結果を Figure 6.28~Figure 6.31 に示し、それぞれに対して考察を行う。なお、いずれの結果もカラーバーに関する設定は、コンピュータの自動設定となっている。

Figure 6.28 にフィルタ 1 を R 値に関して画像処理を行った結果を、Figure 6.29 にフィルタ 1 を I 値に関して画像処理を行った結果を示し、Figure 6.30 にフィルタ 2 を R 値に関して画像処理を行った結果を、Figure 6.31 にフィルタ 2 を I 値に関して画像処理を行った結果を示す。

Figure 6.28 は、同様のフィルタを Y 値に適用した Figure 6.25 と比較して、模型の輪郭の強度分布に多少の違いはあるものの、衝撃波の抽出部分やノイズに関してはそれほど大きな変化は見られなかった。Figure 6.29 は、同様のフィルタを Y 値や R 値に適用した Figure 6.25 や Figure 6.28 と比較して、ノイズが大幅に低減されているという結果を得た。その分、その他の部分の出力もやや小さくなっているように見えるが、これはカラーバーの設定範囲を変える、もしくはフィルタ全体により大きな値をかけることにより、よりはっきりとした模型の輪郭や衝撃波の抽出ができると思われる。Figure 6.30 は、同様のフィルタを Y 値に適用した Figure 6.27 と比較して、ノイズの量や大きさはそれほど大きな変化はないものの、模型の輪郭や衝撃波の抽出部分がよりはっきりと抽出されていることが分かる。Figure 6.31 は、同様のフィルタを Y 値や R 値に適用した Figure 6.27 や Figure 6.30 と比較して、ノイズが大幅に低減されているという結果を得た。模型下方の衝撃波はあまりはっきりとしないものの、模型の輪郭やボディフラップ下方の衝撃波はしっかり抽出されており、良好な結果と考えられる。

これらの結果より、種類の異なる色空間だけでなく、同じ色空間でも特性の異なる成分ではフィルタによる近傍処理の結果は大きく異なることがわかった。また、今回用いたものとは異なる色空間を用いることにより、さらにはっきりとした模型の輪郭や衝撃波を抽出できる可能性があることがわかった。

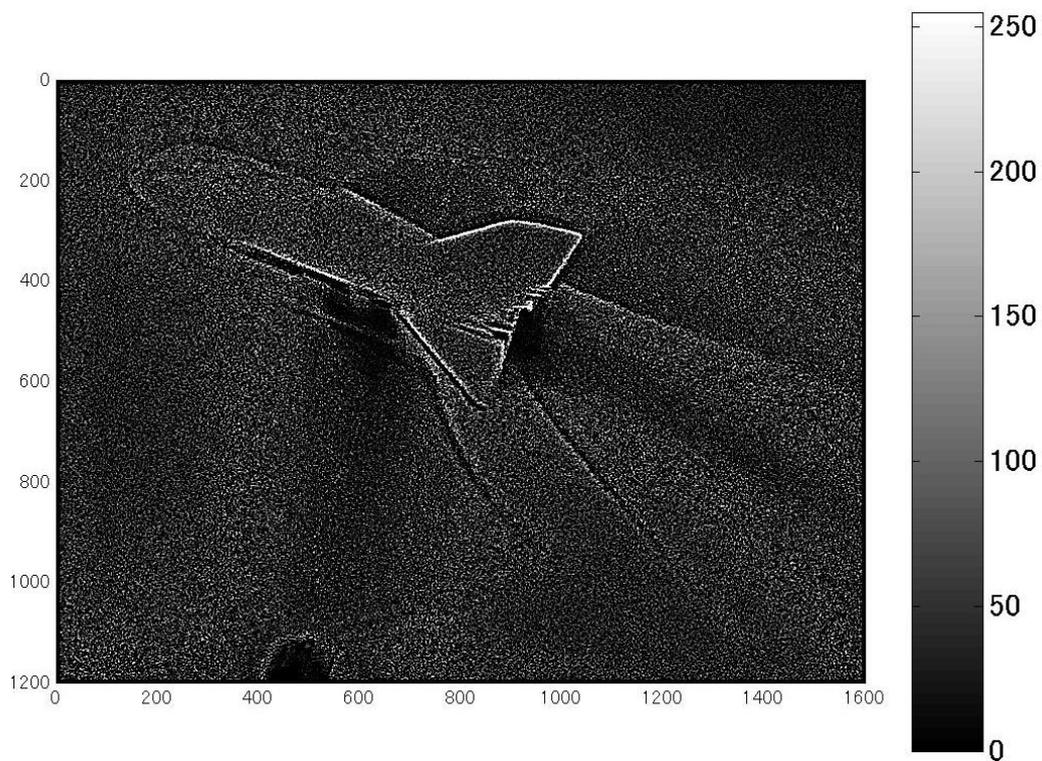


Figure 6.28 : Intensity Image [R] (Laplacian-Gaussian Filter : $\times 100$)

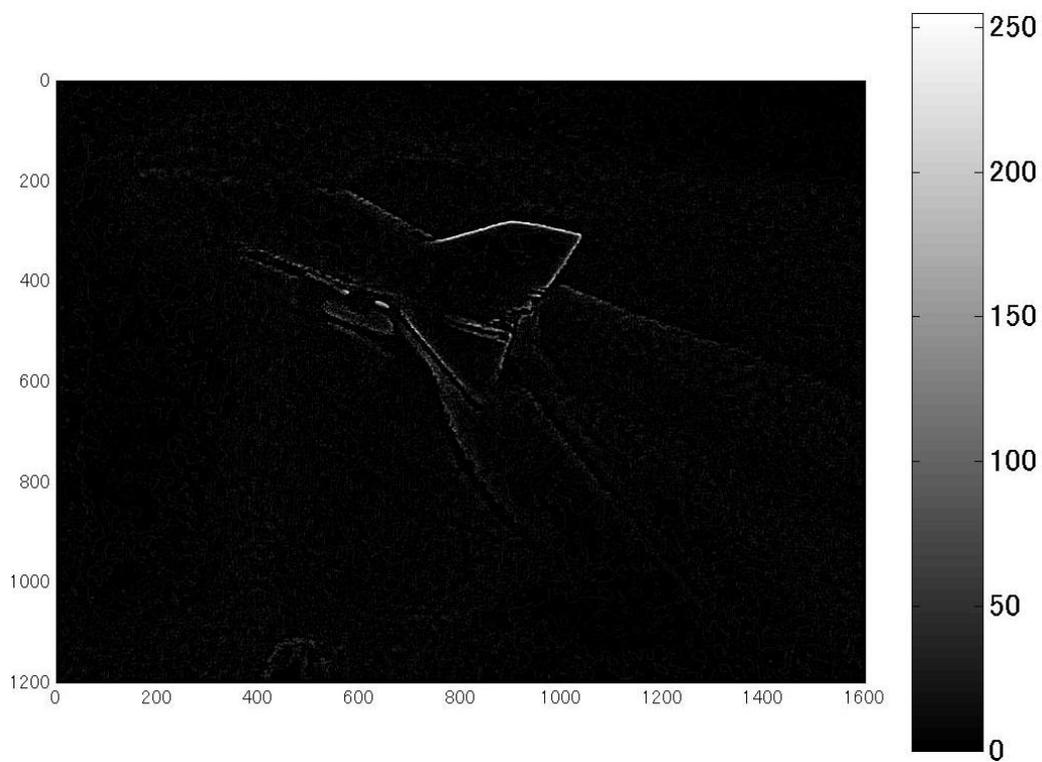


Figure 6.29 : Intensity Image [I] (Laplacian-Gaussian Filter : $\times 100$)

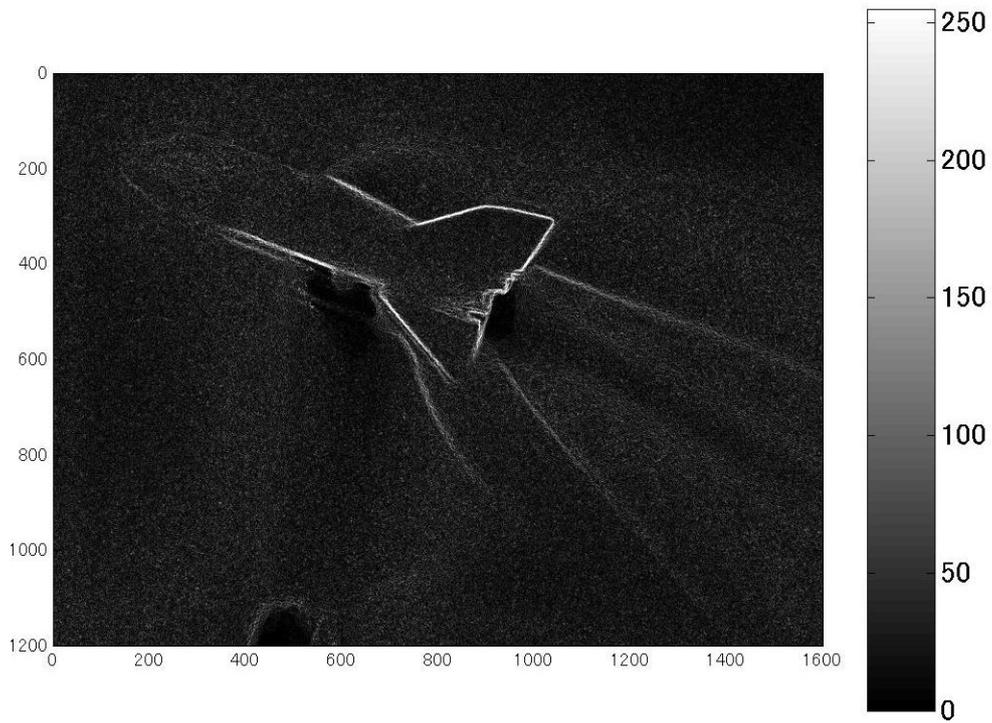


Figure 6.30 : Intensity Image [R]
 (Sobel Filter (absolute(x direction) + absolute(y direction)))

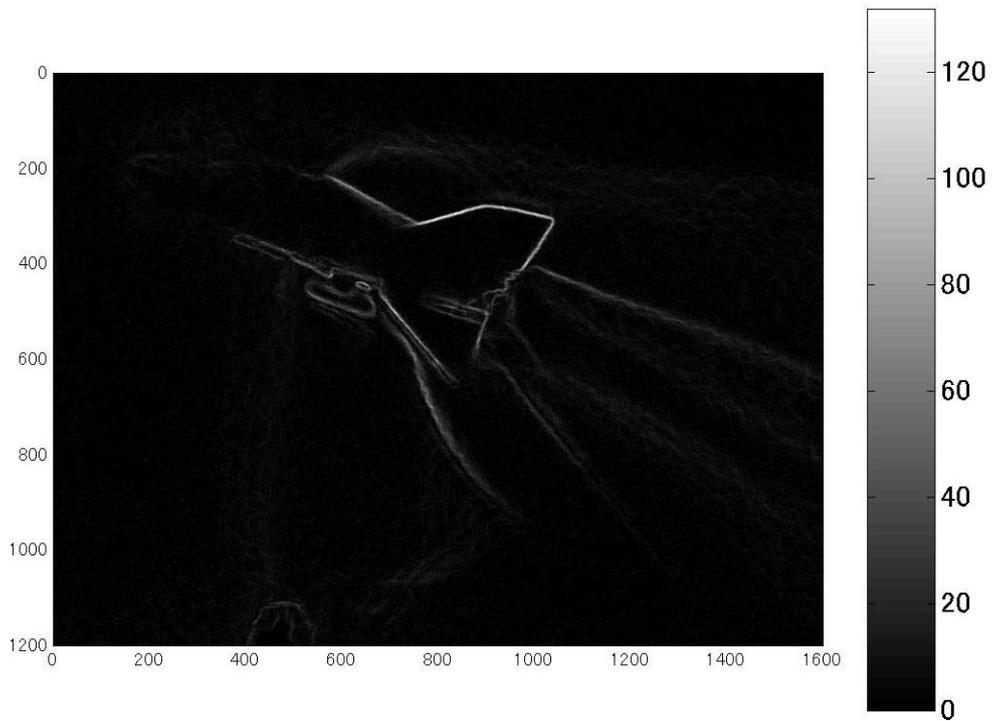


Figure 6.31 : Intensity Image [I]
 (Sobel Filter (absolute(x direction) + absolute(y direction)))

6.4 まとめ

この章で得られた知見に関して、以下にまとめる。

各色空間に関して

それぞれの色空間の成分を強度分布図に示すことにより、その違いを確認した。

各フィルタに関して

それぞれのフィルタを用いた近傍処理により、その違いを確認した。

フィルタ処理の回数に関して

フィルタ処理の回数を増やすほど計算点近傍の値の影響が大きくなり、ノイズが増す傾向にあることが分かった。

改良したラプラシアンガウシアンフィルタに関して

全体の値を約 100 倍したラプラシアンガウシアンフィルタを用いて近傍処理を行うと、模様境界や衝撃波の抽出が行える可能性があることが分かった。

ソーベルフィルタ近傍処理画像の重ね合わせに関して

各方向に感度のあるフィルタを用いて計算した結果の絶対値を重ね合わせると、一方向にしか感度のないフィルタを用いて計算した結果よりも、よりはっきりとした境界を得ることができることがわかった。ただし、重ねあわせによりノイズも増加する傾向があるため、注意が必要である。

色空間とフィルタによる近傍処理に関して

異なる色空間や同じ色空間でも特性の異なる成分に対しフィルタによる近傍処理を行うと、同じフィルタでも結果が異なることが分かった。

まとめ

フィルタに関して、一回のみのフィルタ処理であれば、全体の値を約 100 倍したラプラシアンガウシアンフィルタを用いた近傍処理、複数回のフィルタ処理であれば、各方向に感度のあるフィルタを用いた近傍処理結果の絶対値の重ね合わせで、良好な結果を得ることが分かった。処理時間という観点进行考慮すると、全体の値を約 100 倍したラプラシアンガウシアンフィルタを用いた近傍処理のほうがよいが、安定性・確実性という観点からは、各方向に感度のあるフィルタを用いた近傍処理結果の絶対値の重ね合わせがよいと考えられる。斜め方向にも感度のあるフィルタを用いた近傍処理結果も考慮した結果につ

いては、Appendix にて示す。

色空間に関しては、ノイズの小さい YIQ 空間の色差成分である I 値成分や Q 値成分への近傍処理の適用により、よい結果が得られると思われる。

また、本文中では述べていないが、第一放電法[4]と第二放電法[5]では、もともと境界部がはっきり分かれている場合、すなわち発光部と非発光部により衝撃波が観測されている場合は第一放電法のほうがきれいに抽出されると思われる。

第7章 結論

本研究の目的であった、低コストで高い機動性を持つ極超音速風洞である衝撃風洞に、同じく低コストかつ設定自由度の高い放電発光法を用いて、極超音速飛行体周りの流れについて低コストかつ柔軟性の高い可視化画像取得方法を示し、その適用性・有用性を確認することができた。

さらに、以下に示す放電発光法に関する不明点や問題点に対しても本研究を通して結論を得た。

■放電発光法に関する不明点や問題点

- ・気流成立時に放電発光が生じているのか(放電発光のタイミング)?
- ・発光部が極超音速流に流されてしまうトレーサーのような効果はあるのか?
- ・放電発光法の特徴として挙げられる模型前方や後方からの流れに垂直な方向の断面の可視化は可能か?

●ハイスピードカメラを用いた放電発光のタイミングの確認実験より

- ・放電現象はデジタルリターダーによる時間遅延とは無関係であり、測定室内への極超音速流の流入による圧力、すなわち気体数密度の上昇により生じ、計測された電流のピークと対応していることが分かった。
- ・発光部が極超音速流に流されてしまうトレーサーのような効果は確認できなかった。

●半球模型周りの流れ場の可視化および数値計算より

- ・放電発光法により衝撃波が可視化されていることが分かった。
- ・放電発光のタイミング確認の実験と合わせ、放電現象が測定室内への極超音速流の流入による圧力、すなわち気体数密度の上昇により生じていることに対し、可視化結果に大きな影響はないことが分かった。

●極超音速飛行体周りの流れ場の可視化より

○大きな姿勢角をとった場合

- ・それぞれの場合の飛行体周りに生じる衝撃波を可視化することができた。また、放電発光法の特徴の一つである模型後方からの流れに対し垂直な方向の断面の衝撃波の可視化ができた。

○ボディフラップを設置した場合

- ・ボディフラップの高さを変化させ、それぞれの場合の飛行体周りに生じる衝撃波を可視化することができた。また、模型先端から生じる衝撃波とボディフラップによって生じる衝撃波の衝撃波－衝撃波干渉により、局所的に空力加熱が大きくなり、その結果、高温になると考えられる位置を確認できた。

○ボディフラップが損傷した場合

- ・ボディフラップが損傷した場合の飛行体周りに生じる衝撃波を可視化することができた。

●可視化画像の衝撃波抽出より

- ・放電発光法により得られた可視化画像の各色空間の成分を確認した。また、さまざまなフィルタを用いた近傍処理を行うことにより、各フィルタの効果を確認し、適当な色空間に対し適当なフィルタを用いる近傍処理を行うことにより、模型の輪郭線や衝撃波の抽出ができる可能性を示した。

今後の課題

放電発光法のさらなる発展のために、今後の課題を示す。

- ・放電発光法の明確な理論の解明
- ・よりきれいに可視化ができ、より安定で合理的な放電回路の開発
- ・放電発光時の電圧の計測
- ・放電発光が流れに与える影響
- ・画像処理による衝撃波の抽出および位置の検出

Appendix

放電回路の電圧測定

放電回路に初期電圧としてある程度の高電圧を印加し、測定室内が数 Pa ~ 数百 Pa 程度であるとき、針状電極と模型に設置した電極の間が光りはじめ、導通するようになる現象が観測される。この状態のとき、放電回路の各点の電圧をテスターにより計測した。その結果を Figure に示す。なお、計測時、テスターが抵抗となってしまうため、またこの回路はコンデンサを二つ持ちそれらが振動しているため、得られた電圧は 10% 程度の誤差がある。

赤い楕円で囲われた部分は、± 数 V の範囲を周期的に振動している。この振動は、コンデンサ C1 および C2 が充放電を繰り返していることが原因と思われる。

これらの結果を参考に、より安定できれいに可視化できる放電回路の開発が行われることを期待する。

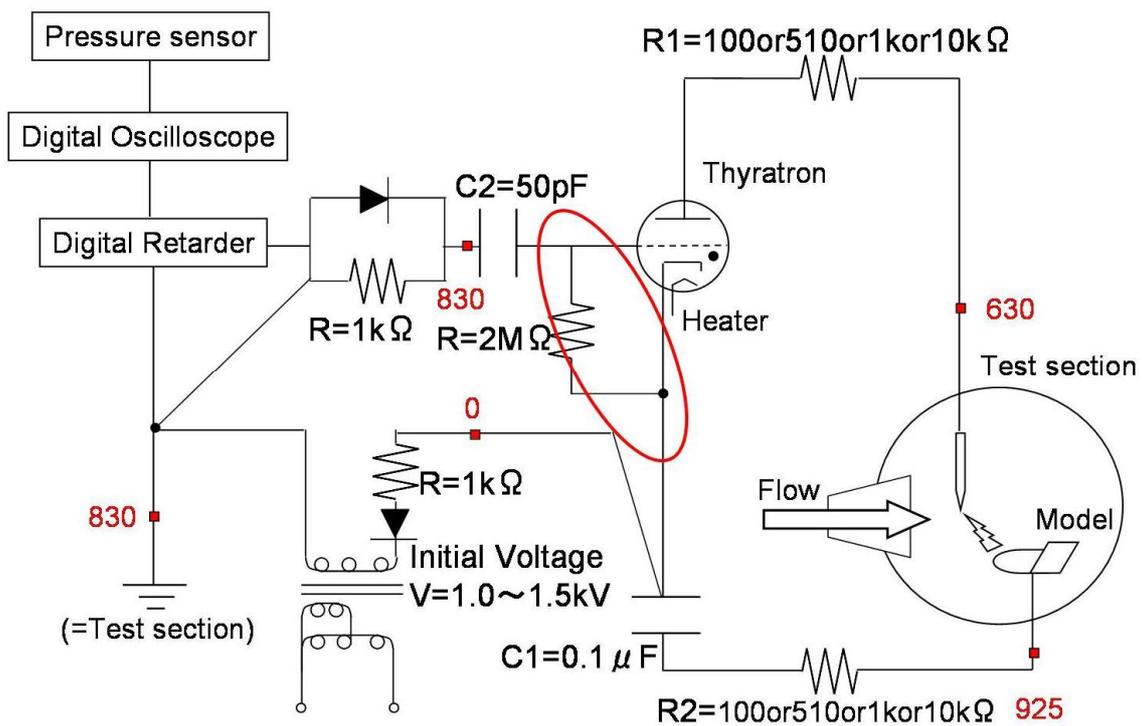


Figure : Discharge Circuit (Unit : V)

数値解析に用いた支配方程式に関して[3]

数値解析では、以下のような圧縮性の軸対称 Navier-Stokes 方程式を用いた。長さは基準長さ L 、速度は一様流速度 V 、密度は一様流密度、温度は一様流温度 T 、粘性係数は一様流粘性係数 μ 、圧力は V^2 で無次元化した。

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{E} - \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial(\hat{F} - \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\hat{H} - \hat{H}_v}{y} = 0$$

$$\hat{Q} = \frac{1}{J} Q$$

$$\hat{E} = \frac{\xi_x}{J} E + \frac{\xi_y}{J} F$$

$$\hat{F} = \frac{\eta_x}{J} E + \frac{\eta_y}{J} F$$

$$\hat{H} = \frac{1}{J} H$$

$$\hat{E}_v = \frac{\xi_x}{J} E_v + \frac{\xi_y}{J} F_v$$

$$\hat{F}_v = \frac{\eta_x}{J} E_v + \frac{\eta_y}{J} F_v$$

$$\hat{H}_v = \frac{1}{J} H_v$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e + p)v \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (e + p)v \end{bmatrix}$$

$$E_v = \frac{1}{\text{Re}} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \beta_x \end{bmatrix}, \quad F_v = \frac{1}{\text{Re}} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \beta_y \end{bmatrix}, \quad H_v = \frac{1}{\text{Re}} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \alpha_y \\ \beta_y \end{bmatrix}$$

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3}\mu \left(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{v}{y} \right)$$

$$\tau_{yy} = \frac{2}{3}\mu \left(2\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{v}{y} \right)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\alpha_y = 2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{v}{y} \right)$$

$$\beta_x = \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + \frac{\mu}{\text{Pr} M^2 (\gamma - 1)} \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\beta_y = \tau_{yx}u + \tau_{yy}v + \frac{\mu}{\text{Pr} M^2 (\gamma - 1)} \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$M = \frac{V_\infty}{\sqrt{(\gamma - 1)C_p T_\infty}}, \quad \text{Re} = \frac{\rho_\infty L V_\infty}{\mu_\infty}, \quad \text{Pr} = \frac{C_p \mu_\infty}{k_\infty}$$

一般座標変換のヤコビアンとメトリックスは

$$\frac{1}{J} = \begin{vmatrix} x_\xi & y_\xi \\ x_\eta & y_\eta \end{vmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \xi_x & \eta_x \\ \xi_y & \eta_y \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} y_\eta & -y_\xi \\ -x_\eta & x_\xi \end{bmatrix}$$

である。

電極を入れ替えた場合の可視化画像

3.2 放電発生装置の本文中で、針状電極を陰極、模型側の導電性テープが陽極となる理由について述べた。ここでは、電極を入れ替えて実験を行い、得られた結果を紹介する。

Figure に迎角が -20° のときの極超音速飛行体周りに生じた流れに対し垂直な断面の衝撃波の後方からの可視化結果を示す。このとき、陽極となる導電性テープは Figure 5.1 右上図に示すように、胴体部後方のくぼみ部分に流れに垂直になるように貼り付けてあり、翼外側部分のみセロハンテープで被覆している。針状電極は模型上面側に置かれ、模型上部周りの衝撃波の可視化を行っている。電極間距離は4~5cm程度である。

Figure では、模型先端から生じた離脱衝撃波(衝撃波 1)と翼前縁部で生じた離脱衝撃波(衝撃波 2)、および衝撃波 1 と衝撃波 2 の衝撃波 - 衝撃波干渉を観測することができる。この結果は、針状電極を陰極、模型側の導電性テープが陽極の場合ではあまり観測することができない。なぜなら、針状電極を陰極、模型側の導電性テープが陽極の場合、針状電極から電子が飛び出す、翼部分が被覆されていない場合、より針状電極と距離が近い翼部分で放電路を形成し、距離が遠い胴体部は放電路になりにくいからである。電極を入れ替えた場合、電流の向きが逆になり、したがって電子の飛び出す方向も模型側の導電性テープから針状電極になる。それゆえ、このような可視化ができたと思われる。

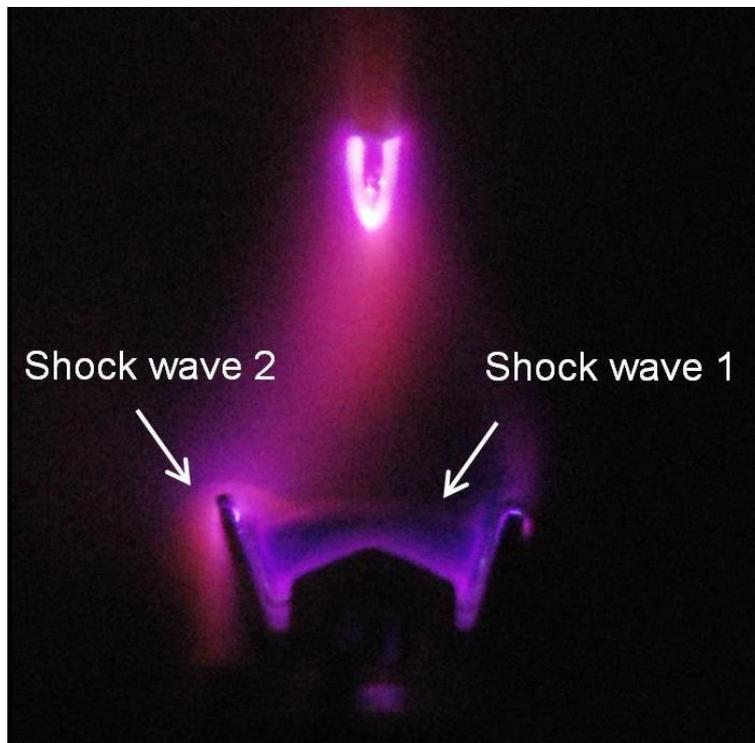


Figure : Shock wave around Lifting-Body (Angle of attack : -20° , Back shot)

断面の厚さに関して

Figure に Figure と同様のセッティング、設定で側方からの可視化結果を示す。この結果より、流れに対し垂直な断面が 5mm 程度の厚みであることがわかる。このとき、模型に貼付してある導電性テープは 2mm である。より断面の厚みを小さくするためには、模型に貼付する導電性テープの幅を小さくすればよいと考えられる。

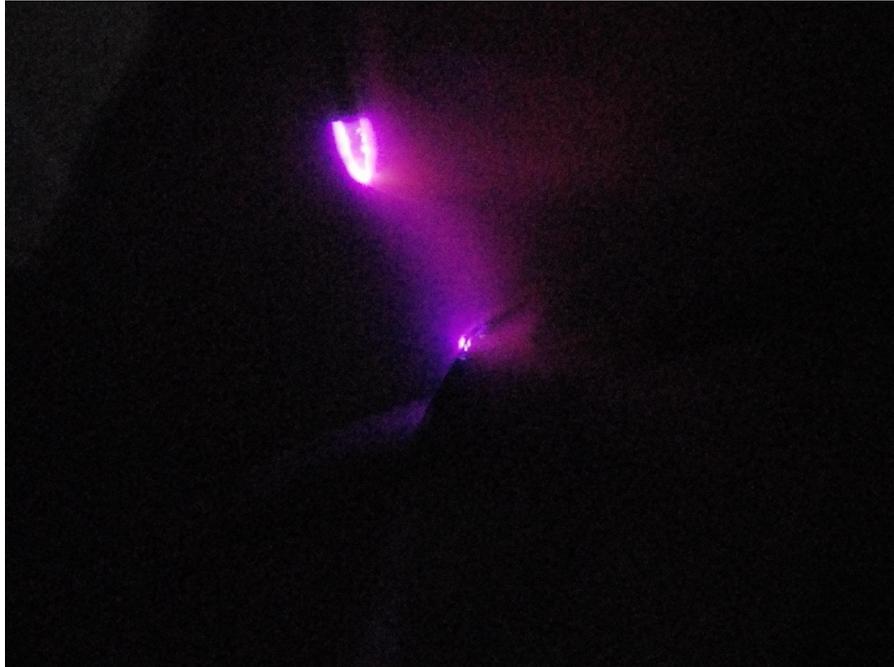


Figure : Shock wave around Lifting-Body (Angle of attack : -20°)

各方向に感度のあるフィルタを用いた近傍処理結果の絶対値の重

ね合わせ

各方向に感度のあるフィルタを用いた近傍処理結果の絶対値の重ね合わせで、良好な結果を得られることが分かった。ここでは、x 方向、y 方向に感度のあるソーベルフィルタに加え、Figure 6.30 に示すような斜め方向に感度のあるフィルタを用いた近傍処理結果の絶対値の重ね合わせの結果を Figure 6.31 に示す。なお、これは I 値に関して画像処理を行った結果であり、カラーバーに関する設定は、コンピュータの自動設定となっている。

x 方向、y 方向だけを考慮した Figure 6.31 と比較して、よりはっきりと模型の輪郭、衝撃波の抽出ができています。本研究では、ノイズの少ない I 値に関する強度分布図に対し、この近傍処理を行った結果が最も良好な結果だと言える。

0	-1	-2	-2	-1	0
1	0	-1	-1	0	1
2	1	0	0	1	2

Figure 6.31 : Original Filter (Left : (a)-x-y direction, Right : (b)+x-y direction)

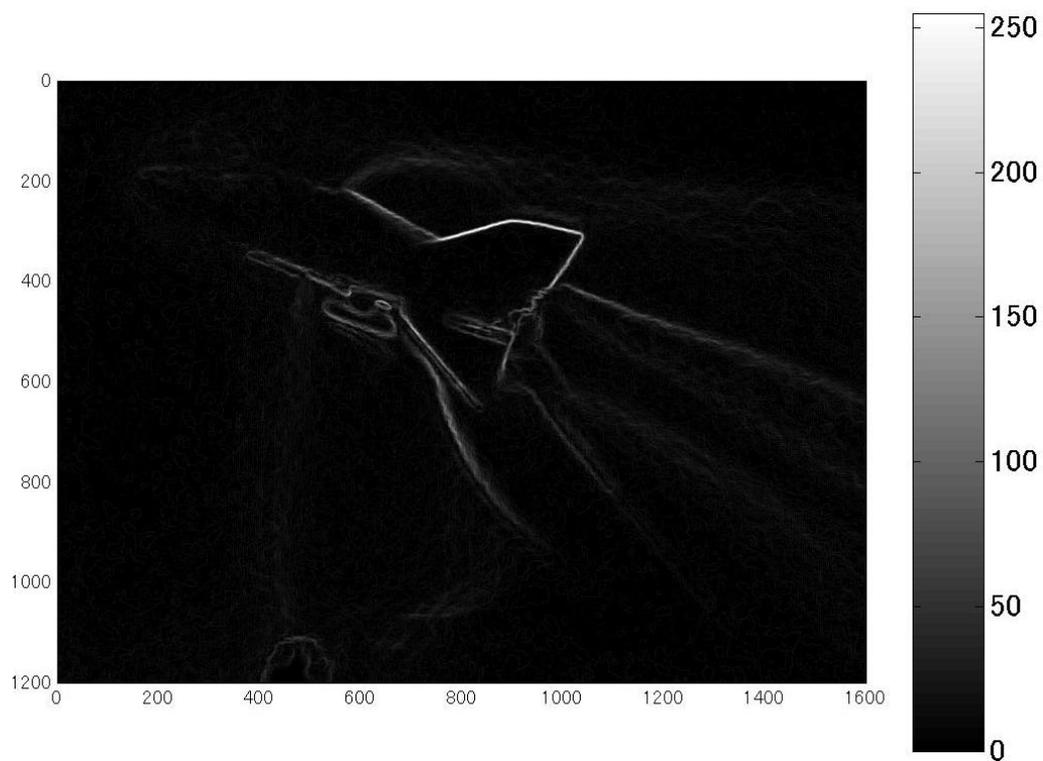


Figure : Intensity Image [I]
(Sobel Filter (absolute(x direction) + absolute(y direction)
+ absolute(-x-y direction) + absolute(-x-y direction)))

謝辞

本論文を執筆するにあたり、ご指導・ご協力して下さった皆様に厚く御礼申し上げます。

指導教官である鈴木宏二郎准教授には、懇切丁寧にいろいろなことを指導していただきました。実験をやりたいと言った私に、衝撃風洞を用いた放電発光法という興味深いテーマを与えてくださり、この研究ができたことを感謝しております。高速流や放電発光に関してあまり知識のなかった私でしたが、質問には分かりやすく丁寧に答えてくださり、研究に行き詰ったときには今後の方針や改善点を示してくださりました。また、先生からは知識だけではなく、行き詰ったときの打開の仕方や考え方、いろいろなことに興味を持ち勉強し続ける姿勢、ひらめきの重要性など、社会人になってからも重要な方法や姿勢についても勉強させていただきました。

福山大学工学部機械工学科の西尾正富教授には放電発光法の放電回路を提供していただきました。まだ私がこの研究を始めたばかりの頃に一度お会いさせていただきましたが、その際、私の拙い質問にも快く受け答えしていただきました。この回路のおかげでこの修士論文を執筆できました。

株式会社デジモ、株式会社ノビテック、株式会社ナックイメージテクノロジーには、ハイスピードカメラをお借りして、実験させていただきました。わざわざ学校にきてくださって実験にご協力くださりありがとうございました。

綿貫忠晴助教授には、特に実験装置に関する部分で協力していただきました。測定室内に鏡を固定する方法でしばらく悩んでいた私に、立派な固定台を作る協力をしてくれました。あの固定台のおかげで、放電発光法の利点の一つである模型後方からの衝撃波の可視化ができました。

今村幸助教授には、ちょっとした疑問や、どう手をつけていいかわからないことなど、さまざまなことで相談させていただきました。お忙しい中、些細なことでもよく話を聞いてくれて、頼りにさせていただきました。

研究室の先輩の矢野良輔さんには、少し違った世界を見せていただきました。矢野さんの研究は難しくよく分かりませんが、そうであっても矢野さんの研究はすごいと思いました。

研究室の先輩の上野篤史さんには、陰ながら発表の仕方やスライドの作り方を学ばせていただきました。上野さんのスライドや発表はいつも分かりやすく、参考にさせていただきました。

研究室の先輩の高間良樹さんには、たびたび実験を手伝っていただき、また些細な疑問にも分かりやすく丁寧に答えていただきました。それ以外にも、朝から夜までひたすらがんばる研究姿勢、ものすごく前向きな考え方、室長としてみんなをうまくまとめて楽しい

雰囲気を作るリーダーシップなど数多くのことを学ばせていただきました。

研究室の先輩の石田智樹さん、坂本真透さんには、よく遊んでいただきました。2006年の夏に、ミニ四駆を買いに国道16号線を自転車で走ったことは忘れられない思い出の一つです。先輩方と過ごした時間は、楽しい思い出ばかりです。

同輩の板橋直亮くん、松本達矢くん、若山一樹くんには、研究だけでなくいろいろとお世話になり、楽しい二年間を過ごすことができました。互いに協力し、また切磋琢磨した結果がこの論文であり、私の研究成果であると思っています。特に若山くんには、半球模型の数値解析で協力していただき、そのおかげで賞をいただけたと思っています。

後輩の金森正史くん、小山将史くん、深川寛也くん、中川亮太くんは、とても優秀だったので、先輩である僕が教えてもらうことも多々あり、勉強になりました。

私の大学院生活は幸運続きだったとつくづく思います。入試のとき、数日前に勉強した線形代数が入試で出題され、入試に合格して第一志望の鈴木研究室に配属されたことや、二年間を通して実験装置に大きなトラブルがなかったこと、学会でわざわざ北海道にまで行かせていただいた上に学生セッション銀賞をいただいたこと、そして何より、素晴らしい研究室の皆様にも恵まれて、研究も日常生活も楽しいことでいっぱいでした。鈴木研究室での大学院修士課程の二年間を過ごせたことを幸せに、また誇りに思っています。

最後に、大学院卒業まで面倒を見てくれた両親、および家族の皆様には感謝いたします。どうもありがとうございました。

参考文献

- [1] JAXA ホームページ : <http://www.jaxa.jp/>
- [2] 塚本太郎、南吉紀、石川和敏、富田博史、元田敏和 : LIFLEX 飛行実験計画について、平成 18 年度総合技術研究本部/航空プログラムグループ 公開研究発表会 前刷集(研究発表(展示))、2006 .
- [3] 久保田弘敏、鈴木宏二郎、綿貫忠晴 : 宇宙飛行体の熱気体力学、東京大学出版、2002 .
- [4] 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、vol. 40、pp.646-651、1992 .
- [5] 西尾正富 : 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、日本航空宇宙学会誌、vol. 41、pp.707-711、1993 .
- [6] 西尾正富 : 極超音速飛翔体周りの流れ場の放電を利用する可視化法(放電発光法)、日本航空宇宙学会誌、vol. 44、pp.347-353、1996 .
- [7] 西尾正富、小竹睦夫 : 極超音速流の可視化法 放電法、ipc、2005 .
- [8] Nasser, E. : Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics、Wiley Interscience、pp.74-75、1970 .
- [9] Engel, V. : Ionized Gases、Oxford University Press、pp.122-123、1965 .
- [10] Nishio, M. : Qualitative Model for Visualizing Shock Shapes、AIAA J.、vol. 30、pp.2346-2348、1992 .
- [11] Engel, V. : Ionized Gases、Oxford University Press、pp.62-63、1965 .
- [12] 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、vol. 2、No. 5、pp.113-123、1967 .
- [13] 菅沼邦彦 : ガンタンネルを用いた物体まわり極超音速流の高温気体効果に関する実験的研究、東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 2004 年度修士論文、2005 .
- [14] 福田健太郎 : 惑星大気圏突入シミュレーションに向けた 2 段式高エンタルピー Gun Tunnel の開発と研究、東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻 2001 年度修士論文、2002 .
- [15] 山崎耕造 : 今日からモノ知りシリーズトコトンやさしいプラズマの本、日刊工業新聞社、2004 .
- [16] 井藤創、溝口誠 : 極超音速流中における衝撃波可視化のための放電特性について、日本航空宇宙学会論文集、Vol.51、pp.653-658、2003.
- [17] Yoon, S. : Lower-upper symmetric-Gauss-Seidel method for the Euler and Navier-Stokes equations、AIAA J.、Vol. 26、pp.1025-1026、1988.
- [18] Yee, H. : Upwind and Symmetric Shock-Capturing Schemes、NASA TM 89464、

pp.20-22、May、1987.

[19] 藤井孝蔵：流体力学の数値計算法、東京大学出版会、1994

[20] 安居院猛、中嶋正之：画像情報処理、森北出版、1991.

[21] 田村秀行：コンピュータ画像処理、オーム社、2002.

[22] 村松正吾：MATLABによる画像&映像信号処理、CQ出版社、2007.

本論文に関する学会発表リスト

- [1] 児島佳敬、鈴木宏二郎：大きな姿勢角をとる極超音速飛行体周り流れ場の放電発光法による可視化、第4回極超音速機フォーラム、2007.
- [2] 児島佳敬、鈴木宏二郎：大きな姿勢角をとる極超音速飛行体周り流れ場の放電発光法による可視化、第51回宇宙科学技術連合講演会、1G15、2007.

本論文に関する受賞リスト

- [1] 第51回宇宙科学技術連合講演会 学生セッション銀賞
児島佳敬、鈴木宏二郎：大きな姿勢角をとる極超音速飛行体周り流れ場の放電発光法による可視化、第51回宇宙科学技術連合講演会、1G15、2007.