

1. 緒言

デブリクラウドの進行速度や膨張速度は、デブリ衝突を模擬した超高速衝突実験の撮影画像から求められている。速度の測定のためには、デブリクラウドの形状を決定する必要がある。そこで、デブリクラウドとデブリクラウド以外の部分とを区別する境界線を定めることが要求される。Chiらは高速カメラによって撮影されたデブリクラウドの画像に対し、デブリクラウドの形状や速度を解析した^[1]。しかし、その境界を特定するに当たり、観測者による主観性が入っており、デブリクラウド形状の測定の精度は高くない。

本研究では、高速カメラにより得られたデブリクラウドの画像データに基づき、デブリクラウドの形状を適切に自動抽出する新たな方法を提案する。詳細は文献^[2]を参考にされたい。

また、光化学物質を塗布したバンパーを用いて、超高速実験を行い、発光の実験も行った。光化学物質と接着物質を混合し、宇宙ステーションのWhipple bumperを模擬した二枚組アルミ板の二枚目内側に塗る。2段式軽ガス銃を用いて、スペースデブリ衝突を模擬した超高速衝突実験を行い、衝突部位周囲が発光するか検証した。本稿では、この発光実験についても報告を行う。

2. スペースデブリ高速衝突試験と試験結果

デブリとバンパシールドとの高速衝突を模擬した実験を行うために、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が保有する二段式軽ガス銃を用いた。本実験では、バンパを模擬したアルミニウム平板に対して、デブリを模擬したプロジェクトイルを衝突させた。バンパは、大きさが300×300 mmで、厚さは0.5 mmのものを使用した。プロジェクトイルは直径7.14 mm、質量0.228 gのポリカーボネート球を使用し、速度を7.06 km/sとした。バンパにプロジェクトイルが衝突した後に発生するデブリクラウドの様子を撮影するために、高速カメラHyper Vision HPV-X(島津製作所)を使用した。撮影結果は、400×250(10万画素)、各画素8 bitのデジタルデータで保存される。図1に高速カメラによる撮影画像を示す。デブリクラウドを構成する破片や粒子が非常に細かいため、撮影画像からはデブリクラウドの境界をはっきりとは特定できないことが分かる。撮影画像に対し画像処理を行い、境界を特定する必要がある。

3. デブリクラウド形状の自動抽出法

3.1 背景差分処理

図1より、高速カメラによるデブリクラウドの撮影画像はグレースケール画像で出力される。各ピクセルの輝度は0~255の数値で表される。0が最も暗く255が最も明るい値を指している。デブリクラウドとデブリクラウド以外との輝度の境

(しきい値)を決定することで、デブリクラウド(しきい値以下)とデブリクラウド以外(しきい値より大きい)を区別することができる。ところが、デブリクラウドの先端部を拡大した図2より、デブリクラウドの境界で輝度が連続的に変化しているため、しきい値が観測者によってばらつく。そこで、デブリがバンパに衝突する前の画像とデブリクラウドの画像との差分をとることで、輝度が下がった領域と、輝度が変化しないか上昇した領域を抽出した。輝度が変化しないか上昇した領域はデブリクラウドである可能性は全くないので、輝度0としている。

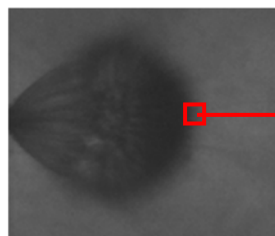


Fig. 1 Debris cloud (8 μ s after impact)



Fig. 2 Magnified view of Fig. 1

差分した画像(差画像)を図3に示す。輝度が下がった領域(輝度1~255)には、デブリクラウドの領域だけではなく、フレームによって照明が異なった領域も含む。デブリクラウド領域と、フレームによって照明が異なった領域とを区別する必要がある。2つの領域の境界となる輝度(しきい値 T)を設定する。画像中における輝度1以上 T 以下のピクセルを背景領域、輝度 T より大きく255以下のピクセルをデブリクラウド領域とする。本研究ではこのしきい値 T を数学的手法により自動的に選定する。

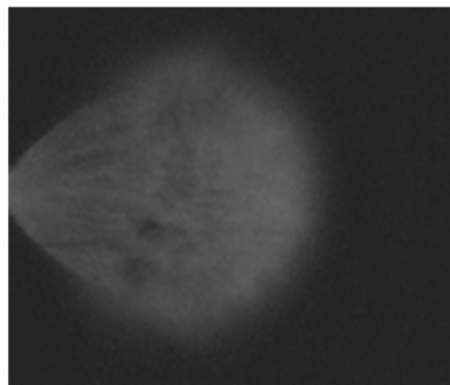


Fig. 3 Subtraction image of Fig. 1

3.2 従来手法 (Kittlerの方法)

しきい値を自動的に選択する方法として、「Kittlerの方法」^[3]がよく知られている。Kittlerの方法は、濃淡のヒストグラムを画像中の全ピクセル数で正規化した分布(正規化ヒストグラム)を用いた方法である。縦軸は、各輝度における正規化されたピクセル数、横軸は輝度である。正規化ヒストグラムが、2つの正規分布の和で表せることを仮定する。本研究で用いる図3の正規化ヒストグラムを図4に示す。図4において、横軸は輝度、縦軸は各輝度における正規化されたピクセル数である。輝度1にピークを持つ分布に属するピクセルが背景領域、輝度40付近にピークを持つ分布に属するピクセルがデブリクラウド領域となる。従来方法では、正規化ヒストグラムが、背景分布とデブリクラウド分布から成り立つとする。背景分布とデブリクラウド分布は、共に正規分布に従うと仮定する。

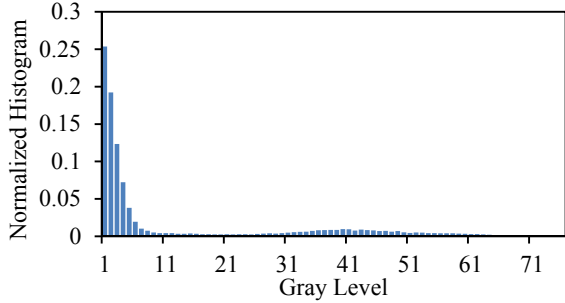


Fig. 4 Normalized histogram of Fig. 3

あるしきい値 T で図4の正規化ヒストグラム $p(g_j)$ ($j=1, 2, \dots, 255$) を2分割する。それぞれから計算される $p(C_i)$, μ_i , σ_i^2 ($i=1, 2$) を、各分布の面積、平均、分散の推定値とする。 $p(C_i)$, μ_i , σ_i^2 ($i=1, 2$) は、式(1)から式(5)のようにそれぞれ求める。

$$p(C_1) \equiv \sum_{j=1}^T p(g_j), p(C_2) \equiv \sum_{j=T+1}^{255} p(g_j) \quad (1)$$

$$\mu_1 \equiv \left[\sum_{j=1}^T p(g_j) j \right] / p(C_1) \quad (2)$$

$$\mu_2 \equiv \left[\sum_{j=T+1}^{255} p(g_j) j \right] / p(C_2) \quad (3)$$

$$\sigma_1^2 \equiv \left[\sum_{j=1}^T (j - \mu_1)^2 p(g_j) \right] / p(C_1) \quad (4)$$

$$\sigma_2^2 \equiv \left[\sum_{j=T+1}^{255} (j - \mu_2)^2 p(g_j) \right] / p(C_2) \quad (5)$$

あるピクセルが背景またはデブリクラウド領域であったときの、そのピクセルの輝度の値が j である確率 $p(g_j|C_i)$ ($i=1, 2$) は、式(6)で表される。各分布を正規分布に従うと仮定するので、 $p(g_j|C_i)$ ($i=1, 2$) は正規分布の確率密度関数である。

$$p(g_j|C_i) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp \left[-\frac{(j - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (6)$$

評価関数の基準となる平均条件付きエントロピー $H(C|g)$ は、式(7)のように定義される。平均条件付きエントロピー $H(C|g)$ とは、あるピクセルの輝度が j と知った後のそのピクセルがどちらの領域に属するかの変動性を全ピクセルにおいて平均したものである。

$$H(C|g) \equiv -\sum_{j=1}^{255} \sum_{i=1}^2 p(g_j) p(C_i|g_j) \log p(C_i|g_j) \quad (7)$$

$p(C_i|g_j)$ ($i=1, 2$) は、あるピクセルの輝度の値が j であったとき、その輝度を持つピクセルの領域が C_i ($i=1, 2$) である確率を表す。以下のベイズの定理を用いる。

$$p(C_i|g_j) \equiv \frac{p(C_i) \cdot p(g_j|C_i)}{p(g_j)} \quad (8)$$

式(1)から式(8)を式(7)に代入して、

$$\begin{aligned} H(C|g) &\equiv -\sum_{j=1}^{255} \sum_{i=1}^2 p(g_j) p(C_i|g_j) \log p(C_i|g_j) \\ &= -\sum_{i=1}^2 p(C_i) \log p(C_i) \\ &\quad + \sum_{i=1}^2 p(C_i) \left(\log \sqrt{2\pi\sigma_i} + \frac{1}{2} \right) + \sum_{j=1}^{255} p(g_j) \log p(g_j) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)において、しきい値 T に依存しない項を無視すると、評価関数は式(10)となる。

$$J(T) \equiv \sum_{i=1}^2 p(C_i) \log \frac{\sigma_i}{p(C_i)} \quad (10)$$

逐次 T を進めて $J(T)$ が最小となる T を最適なしきい値とする。

上記が従来手法であるが、デブリクラウド画像は差画像であり、1付近の輝度値を持つピクセルが多い。そのためにヒストグラムは正規分布にならない。よって、Kittlerの方法では正確なしきい値が選定されない。そこで本研究では、背景領域が切断ガンマ分布に従うと仮定し、評価関数が最小となるしきい値を選定する。

3.3 本研究で提案する画像抽出手法

図 4 の考察から、背景領域が切断ガンマ分布、デブリクラウド領域が正規分布に従うと仮定する。輝度が 11 以下の領域に於いて、正規化ヒストグラムの形状が左右対称になっていないこと明らかであり、正規分布を仮定する従来手法には欠点があると考え、修正を図る。その結果、各分布の確率密度関数は、次式で表される。

$$p(g_j|C_1) \equiv \frac{j^{k-1} \exp(-j/\theta)/\Gamma(k)\theta^k}{1 - \int_0^1 t^{k-1} \exp(-t/\theta)/\Gamma(k)\theta^k dt} \quad (11)$$

$$p(g_j|C_2) \equiv \frac{\exp[-(j-\mu_2)^2/2\sigma_2^2]}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} \quad (12)$$

$k(= \mu_1^2/\sigma_1^2)$ は形状母数、 $\theta(= \sigma_1^2/\mu_1)$ は尺度母数である。

式(11)の積分は、輝度 j に依らない定数より c と置く。平均条件付きエントロピー $H(C|g)$ は、式(9)と同様の計算により、式(13)となる。

$$\begin{aligned} H(C|g) &= p(C_1)(1-k) \sum_{j=1}^{255} p(g_j|C_1) \log j \\ &+ p(C_1) \left[\log \frac{\Gamma(k)\theta^k}{p(C_1)} + k + \frac{\exp(-1/\theta)}{(1-c)\Gamma(k)\theta^k} \right] \\ &+ p(C_2) \left[\frac{1}{2} + \log \frac{\sigma_2}{p(C_2)} + \log \sqrt{2\pi} \right] \\ &+ \sum_{j=1}^{255} p(g_j) \log p(g_j) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)において、しきい値 T に依存しない項を無視すると、評価関数は式(14)となる。

$$\begin{aligned} J(T) &\equiv p(C_1)(1-k) \sum_{j=1}^{255} p(g_j|C_1) \log j \\ &+ p(C_1) \left[\log \frac{\Gamma(k)\theta^k}{p(C_1)} + k + \frac{1}{(1-c)\Gamma(k)\theta^k e^{1/\theta}} \right] \\ &+ p(C_2) \left[\frac{1}{2} + \log \frac{\sigma_2}{p(C_2)} + \log \sqrt{2\pi} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

逐次 T を進めて $J(T)$ が最小となる T を最適なしきい値とする。

4. デブリクラウドの解析結果と考察

図 5 は図 3 に対する評価関数で、図 5 からしきい値を 16 としたときに $J(T)$ が最小となることが分かる。よって、最適なしきい値は 16 であった。図 6 は図 3 をしきい値 16 で二値化した画像である。今回のしきい値選定法と比較するために、従来手法である Kittler の方法を用いて二値化した画像を図 7 に示す。従来方法でしきい値を決定すると、最適なしきい値は 6 であった。図 8 は正規化ヒストグラムと、しきい値 16 のときの切断ガンマ分布、及び正規分布のグラフである。ガンマ分布と正規

分布の和で表現しようと試みた提案の妥当性が示されている。

図 7 で見られるように、デブリクラウド領域としている白いピクセルが、密集しているところから離れたところにも散在しており、背景領域のピクセルをデブリクラウド領域と混同している。従来手法ではデブリクラウド形状を適切に抽出できていない。以上より、本研究で提案した手法は、従来手法に比べて、より適切にデブリクラウド形状を抽出していることが分かる。

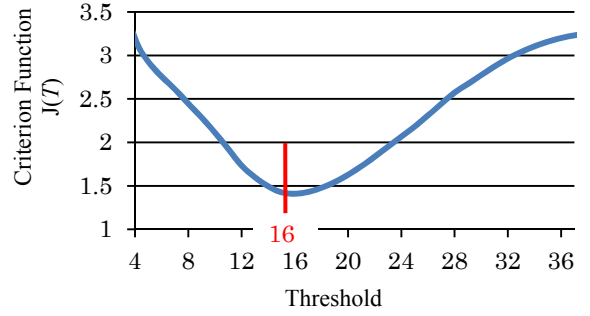


Fig. 5 Criterion function by proposed method



Fig. 6 Binary image by proposed method ($T = 16$)



Fig. 7 Binary image by Kittler's method ($T = 6$)

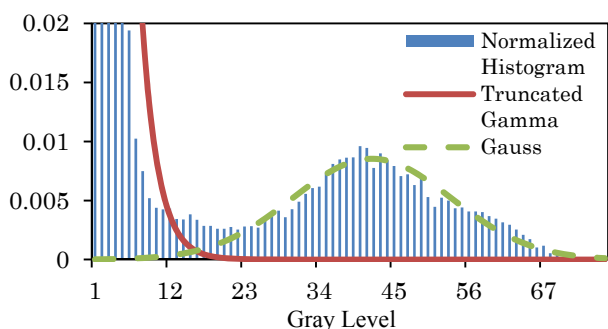


Fig. 8 Normalized histogram, truncated gamma and Gaussian distributions ($T=16$)

5. 超高速衝突による発光実験について

スペースデブリが宇宙ステーションなどの有人宇宙施設に衝突し与圧壁に貫通穴が生じれば、空気漏れが起こる。スペースクルーは早急に貫通穴を発見し対処する必要があるが、衝撃によって電気系統がダウンし、既在のPCを使った位置同定手法は使えない可能性が高い。そこで、暗闇でも貫通穴を認識できる位置表示手法が求められる。これまで、デブリ防護に念頭を置いた研究は多数存在するが、貫通穴が生じることを前提とし、修復に着目した研究は殆ど無い。本研究では、急激な温度・圧力上昇をトリガーにして長時間発光・蓄光する光化学物質を与圧壁内側に塗布することで、暗闇でも衝突貫通穴の周りを長時間発光させ続けるシステムを構築することを研究目的としている。

今回の実験では、超高速衝突後に、無発光体が衝突実験により発光体に化学変化を起こしたことが目視で確認できた。複数回の実験で確認されたので、再現性は十分にあると考える。衝突部分に対する発光部位の分布は、新しい発光マッピングの装置を用いた実験を試みている段階である。また、発光体部位と発光していない部位の構造の違いは、SPring-8^[4]の高輝度なX線を用いたXRD回折測定を試み、結果が得られている。SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV)^[4]とは、独立行政法人・理化学研究所が包括的運営を行っている世界最大規模の大型放射光施設であり、高性能な構造解析が可能である。発光部位の濃度が低いため、現段階ではXRDに差は見られず、定量的に検知出来ていない。真空チャンバー中に光ファイバー等を設置し、真空中であっても分光器を用いて計測するなど高度な観測技術を確立すべく邁進している。

6. 結言

本研究では、高速度カメラにより得られたデブリクラウドの画像からデブリクラウドの形状を適切に抽出する新たな方法を紹介した。従来手法は差画像を想定していないので、妥当なしきい値選定ができないことを示した。提案方法では、デブリクラウド画像データに基づいて、背景分布が切断ガンマ分布に従うと仮定した。誤識別率を用いた評価関数が最小となるしきい値を選定した。提案方法では、デブリクラウド領域が密集し、散在していないことから、背景領域と混同することなくデブリクラウド形状を適切に抽出した。

また、超高速衝突による発光実験について報告した。再現性をもって、発光現象が確認された。今後は証拠となるデータを蓄積すべく定量的な確認を進めていく。

参考文献

- [1] R.Q. Chi, B.J. Pang, G.S. Guan, Z.Q. Yang, Y. Zhu, and M.J. He, "Analysis of Debris Clouds Produced by Impact of Aluminum Spheres with Aluminum Sheets," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, 2008, pp. 1465 – 1472.
- [2] 沖義弘, 松本紀彦, 大谷清伸, 長谷川直, 榎原幹十朗, "誤識別率を用いた超高速衝突のデブリクラウド抽出法," 日本航空宇宙学会論文集 (in press).
- [3] J. Kittler and J. Illingworth, "Minimum Error Thresholding," *Pattern Recognition*, Vol. 19, No. 1, 1986, pp. 41 – 47.
- [4] Spring-8 (Super Photon ring-8 GeV) 概要ウェブ: <http://www.spring8.or.jp/ja/>