

## 広島原爆きのこ雲写真からの高さ推定

小川 文夫<sup>†1</sup> 馬場 雅志<sup>†1</sup>  
日浦 慎作<sup>†1</sup> 浅田 尚紀<sup>†1</sup>

広島への原爆投下によって発生したきのこ雲の高さについては様々な議論がなされてきた。我々はきのこ雲の写真をその特徴により分類し、爆心地に高さを変えた物体を仮想的に配置し、推定されたカメラ位置からの画像を生成することによりきのこ雲の高さを推定した。その結果、きのこ雲が成長していく過程が確認され、高さは最大で約 16km となることが分かった。推定には様々な誤差を含む要因が考えられるため、推定結果の精度を増すにはさらなる検討が必要である。

## Height Estimation of Hiroshima Atomic Bomb Clouds from Pictures

FUMIO OGAWA,<sup>†1</sup> MASASHI BABA,<sup>†1</sup> SHINSAKU HIURA<sup>†1</sup>  
and NAOKI ASADA<sup>†1</sup>

The height estimation of mushroom cloud after the A-bomb explosion at Hiroshima has been a controversial issue for many years. We have tried to classify these pictures by their feature, and measure the height of the cloud from a single picture by superimposing a vertical object on the picture projected in the same geometry. In the result, we confirm the growing of the mushroom cloud, and the height of mushroom cloud is estimated up to 16 kilometer. There is necessity of consideration for accuracy because the result involve error by various reason.

### 1. はじめに

1945 年、広島と長崎に投下された原子爆弾は多大な被害をもたらした。今なお多くの人々がその後遺症に苦しんでいる。被災地域は正確に特定されておらず、補償を受けられていない被爆者も多い。特に、きのこ雲から降った黒い雨に関しては、実際に降った地域よりも狭い範囲しか認定されていない。その一因として、雲の高さが正確に推定されていないことが挙げられる。従来は、エノラ・ゲイ<sup>\*1</sup>の乗組員の報告<sup>1)</sup>を元に高さ 12km まで上昇したと考えられていた。これに対し、地上で撮影された写真を元に、8km との推定が行われ<sup>2)</sup>、その推定結果を元に、黒い雨の降った地域を推定するシミュレーションが行われた<sup>3)</sup>。原爆の全容を解明するため、2008 年より広島市のプロジェクトとして様々な学術分野からのアプローチが行われており、放射能の沈着状況やアンケートによる聞き込み調査を元にした解析の試みがなされている<sup>4)</sup>。我々の研究室でも、画像解析技術を用いてきのこ雲が写った写真からきのこ雲の大きさを解析する研究を行っている。写真からきのこ雲の実際の高さ・幅を推定するにあたっては、その写真がどのような位置から撮影されたのか正確に分かっていないため、実際の大きさが確定できない。もし爆心地からの距離が長くなれば雲の高さは高く推定され、距離が短いとその逆となる。また、カメラの焦点距離などの情報も推定結果に関わってくるが、撮影に用いられたカメラが明らかになっている例は少なく、推定が難解な原因の一つとなっている。

本研究ではこのような対象に対し、実際の写真とシミュレーション結果を合成することにより解析を行う。具体的には、合成的解析 (Analysis by Synthesis) と呼ばれるアプローチにより、写真に関する限られた情報から撮影位置を特定し、爆心地にきのこ雲に見立てた物体を配置することによりきのこ雲の高さを推定した。その結果、雲の高さは最大で約 16km に達することが分かった。以下、2 章で解析対象となるきのこ雲が写った写真について、3 章で雲の高さ・幅を推定するための手法、4 章で推定結果及び考察、5 章で総括を述べる。

### 2. きのこ雲の写真

現段階で入手可能なきのこ雲写真は図 1 に示す通り 22 枚ある。図に示すように、きのこ雲が写った写真には様々な種類があり、撮影に関しての時空間は各々の写真で異なっている。これらの図を撮影時の高度で分類した結果を表 1 に示す。

<sup>†1</sup> 広島市立大学 情報科学研究科 知能工学専攻  
Dept. of Intelligent Systems, Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

<sup>\*1</sup> 広島に原爆を投下した、アメリカ陸軍航空隊の原爆搭載機 B29 の名称

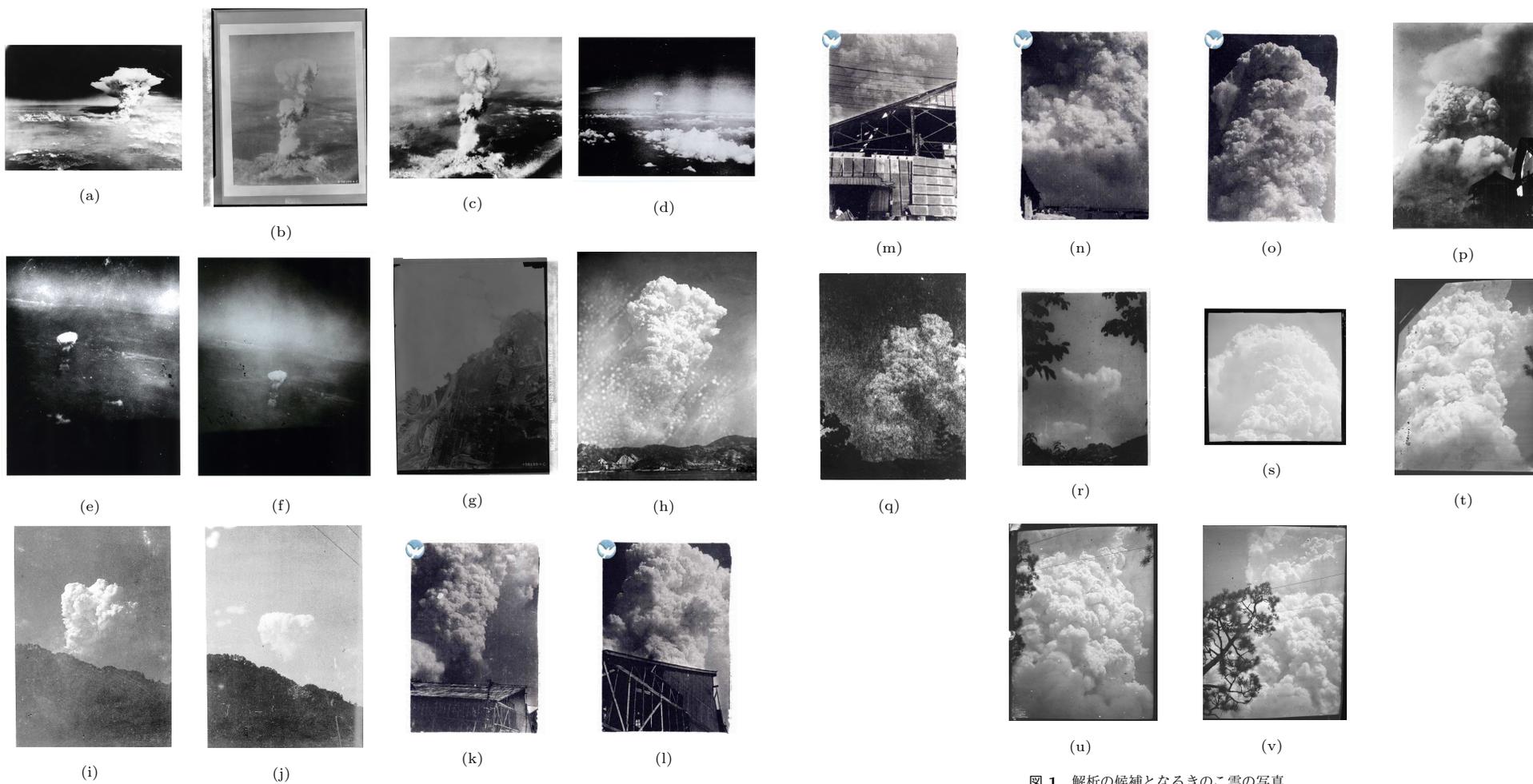


図1 解析の候補となるきのご雲の写真

表 1 写真の分類

上空から撮られた写真	(a),(b),(c),(d),(e),(f),(g)
地上から撮られた写真	(h),(i),(j),(k),(l),(m),(n),(o),(p),(q),(r),(s),(t),(u),(v)

本研究における解析手法では、写真の撮影位置を推定することにより雲の高さ・幅を推定する。そのために必要なのは、写真がどの位置から撮られたのかという情報である。そのためには長さや大きさが分かっている物体が写真に写り込んでおり、写真と実物体との対応が取れなければならない。対応を取るために必要な手掛かりとして、以下のようなものが考えられる。

- 広島市付近の海岸線
- 山の稜線
- 撮影時の情報が得られている

これらの手掛かりにより写真を分類すると、以下の表 2 のようになる。

表 2 写真の手掛かりによる分類

海岸線が写っているもの	(a),(b),(c)
山の稜線が写っているもの	(h),(i),(j)
撮影時の情報が得られているもの	(d),(e),(f)
手掛かりが得られないもの	(g),(k),(l),(m),(n),(o),(p),(q),(r),(s),(t),(u),(v)

次章で各々の特徴に対する解析手法について述べる。

### 3. 雲の高さ・幅の推定

前章で述べたように、雲の写真には様々な種類があり、解析に使えるものはその中でもごく一部である。本章では海岸線が写っている写真、山の稜線が写っている写真、そしてその他の写真を解析の対象とし、その解析手法を述べる。

解析は 2 つの手続きによって行われる。まず、写真上に写っている海岸線や山の稜線といった手掛かりと、仮想的な地図や山などのデータとの位置合わせを行うことにより、実際に写真が撮影された位置を推定する。次に、図 2 に示すように爆心地の位置に原爆の雲を模した棒状の物体を立て、写真上での雲と同じになるように高さを調整する。この時の物体の高さを雲の高さの推定値とする。

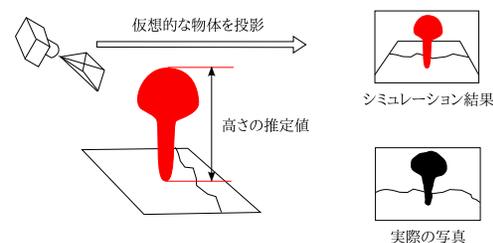
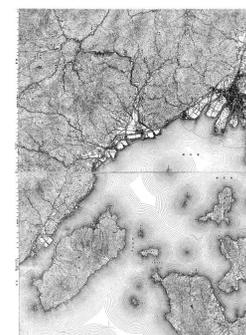


図 2 推定の概要



(a) 上空からの航空写真



(b) 原爆投下時の地図

図 3 海岸線に対する位置合わせの対象となる画像

#### 3.1 海岸線を用いた推定手法

本節では写真に写っている海岸線を用いた雲の解析手法を説明する。ここで取り扱うのは、図 1(a), 図 1(b) に示すように、航空機など、上空から俯瞰気味に撮られた写真である。このような写真には、きのこ雲を中心としてその周辺が収められている。中には広島市近辺の海岸線が写っているものがあり、写真の中で寸法を知るための手掛かりとなる。写真上の海岸線と地図や航空写真上の海岸線との位置合わせを行うことにより、地図と写真との位置関係が求められ、写真が撮影された位置を推定することができる。

地図と写真との位置合わせは以下の手順で行う。上空からの写真(図 3(a))や原爆が投下された当時の地図(図 3(b))をテキストチャリングした平面データを三次元空間上に配置し、写真の海岸線に一致するように視点の位置を移動させる。最も一致した時の視点の位置が撮

影位置として推定されることになる。

### 3.2 山の稜線を用いた推定手法

図 1(h), 図 1(i) に示すような地上から撮影したとされている写真は, 雲をやや見上げるような形で撮影されたものが多い。これらの写真は海岸線など地表平面との位置合わせを行うことができないため, 前節で述べた手法を用いることができない。しかし, 写真には雲の根元部分に重なるように山などの稜線が写っているものに対しては, 写っている山を特定し, 山が写真のように見える位置を求めることにより雲の高さを求めることができる。

具体的には, 実際の山の写真を撮影し, 当時の雲の写真と同じように見える位置を特定する。これにより, 撮影位置の推定を行う。

### 3.3 その他の写真

図 1(e) の写真は Gackenbach<sup>\*1</sup>氏が撮影したものであり, 撮影時の証言も残っている。この写真は広島市付近の上空から撮影されたとされているが, きこの雲以外には水平線程度の手掛かりしか写っていない。しかし, 撮影高度に関する本人の証言が得られており, この情報と写真上での雲の根元の位置, 地平線などの情報から爆心地と撮影位置との水平距離を求めることができる。水平距離が同じであれば, 雲をどの方向から撮影しても写真上での雲の高さは等しくなるため, これらの情報から雲の高さが推定可能である。

## 4. 推定結果

前章で紹介した手法をもとに, 雲の高さ・幅の推定を行った。以下に海岸線を用いたもの, 山の稜線を用いたもの, それ以外の特徴を用いたものに分けて推定結果を示す。

### 4.1 海岸線を用いた推定結果

図 1(a), 図 1(b) に示す写真に対して写真と地図との海岸線の位置合わせを用いて撮影位置の推定を行い, 雲の高さ・幅の推定を行った。その結果, 雲の高さ・幅は図 4, 図 5 のように推定された。推定結果の数値を表 3 に示す。1(a) に関しては, 従来の推定結果である

表 3 海岸線を用いた推定結果

対象画像	垂直画角	水平距離 [km]	高さ [km]	幅 [km]
図 1(a)	55.0	56.0	15.5	20.2
図 1(b)	20.4	28.5	7.6	2.9

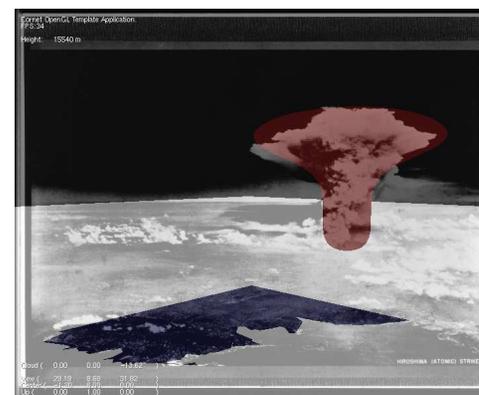


図 4 図 1(a) に対する推定結果

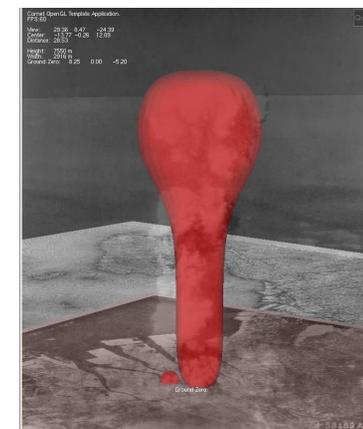


図 5 図 1(b) に対する推定結果

表 4 山などの稜線を用いた推定結果

対象画像	垂直画角	水平距離 [km]	高さ [km]	幅 [km]
図 1(h)	40.0	20.3	10.6	5.6

8km を大幅に上回り, 約 2 倍という結果になった。

### 4.2 山の稜線を用いた推定結果

図 1(h) に対して山の稜線を用いて撮影位置の推定を行い, 雲の高さ・幅の推定を行った。撮影位置は, 証言から当時の呉海軍工廠 (現在の海上保安大学校付近) からではないかと推定された。実際に撮影を行った写真と重ね合わせた結果が図 6 である。合成結果からも明らかのように, 山の稜線や海との境界線がほぼ一致している。推定結果の数値を表 4 に示す。

### 4.3 撮影高度と水平線を用いた推定結果

図 1(e), 図 1(f) に示す写真に対し, 地平線と爆心地, 及び Gackenbach 氏の証言を元に推定を行った。撮影高度は約 30000 フィート (9.144km) とされており, この高度を元に, 雲の根元の位置, 及び水平線の位置合わせにより推定を行った結果を図 7, 図 8 に, 数値を表 5 に示す。

### 4.4 推定結果に対する考察

以上に示した, 各々の種類の写真における推定結果に対しての考察を述べる。雲の高さは単純増加することから, 各々の推定結果を時系列に昇順に並べると図 1(f), (e), (b), (h),

\*1 Russell Gackenbach, 広島原爆投下機エノラ・ゲイと同行した航空機に搭乗していた航空士



図 6 図 1(h) に対する推定結果

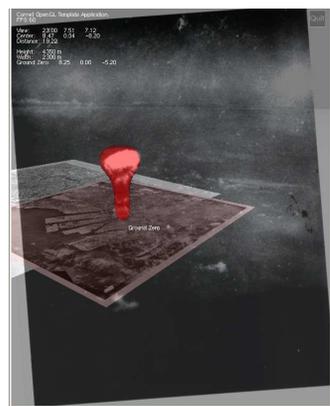


図 7 図 1(e) に対する推定結果



図 8 図 1(f) に対する推定結果

表 5 撮影高度と水平線を用いた推定結果

対象画像	垂直画角	水平距離 [km]	高さ [km]	幅 [km]
図 1(e)	37.4	24.0	3.6	2.0
図 1(f)	37.4	24.0	3.2	1.8

となるため、これが最適な位置とは限らない。そのため、平面上の点群情報を用いてカメラのキャリブレーションを行う手法<sup>5)</sup>を用いたり、誤差評価を行うなどして位置合わせの時点での誤差が推定結果にどの程度影響するのかを考察する必要がある。

海岸線や山の稜線などの情報が写り込んでいない写真の場合は上で紹介した手法を用いることはできない。しかし、大きさが既知の立体的な物体を手掛かりとしての解析も可能であると考えられる。立体的な物体上の特徴点が写真上で6点以上検出できれば、幾何学的なキャリブレーション手法<sup>6)</sup>を用いて撮影位置・姿勢を導出することができる。

## 5. おわりに

本論文では、広島原爆のきのこ雲に関する写真に対して分類を行い、可能なものに対して、各々の種類に応じた高さを始めとする情報の推定を行った。その結果から各写真同士の時系列関係が得られ、雲が3kmから8km, 11km, 16kmと成長していく過程が確認できた。推定結果には様々な誤差を含むため、誤差評価や、幾何学的キャリブレーションなどの手法を用いて精度を向上させることが考えられる。

## 参考文献

- 1) 広島原爆戦災誌, 広島市役所, 1971.
- 2) ヒロシマ・残留放射能の42年, NHK 広島局・原爆プロジェクト・チーム, 日本放送出版協会, 1988.
- 3) 黒い雨に関する専門家会議報告書, 黒い雨に関する専門家会議, 1991.
- 4) 広島原爆”黒い雨”にともなう放射能降下物に関する研究の現状, 広島”黒い雨”放射能研究会, 2010.
- 5) “A General Solution to the P4P Problem for Camera with Unknown Focal Length”, M. Bujnak, Z. Kukelova, T. Pajdla, 2008.
- 6) “Bundle Adjustment A Modern Synthesis”, B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley and A. Fitzgibbon, 2000.

(a)の順になり、雲が3km, 8km, 11kmから16kmと成長していく過程が確認できる。しかし、以上に示した推定結果には、誤差を含む可能性がある。まず、海岸線での位置合わせについては、海岸線が一致するように焦点距離を色々調整し、最適な値を設定した結果であり、この焦点距離が違った場合に推定結果が変わってくる可能性がある。また、位置合わせに関しても手動で行っており、海岸線や稜線が一致しているかについては目視での判断