

THE EPICENTERS OF THE ATOMIC BOMBS
I. AN ESTIMATE BASED ON THERMAL RAY SHADOWS
NAGASAKI

原子爆弾の炸裂点
1. 熱線による残影に基づく推定, 長崎

HARRY H. HUBBELL, Jr., Ph.D.,
EDWARD T. ARAKAWA, Ph.D.
SHOGO NAGAOKA 長岡省吾
SHOICHI UEDA 上田尚一
SUNAO TANAKA 田中 直



TECHNICAL REPORT SERIES

業 績 報 告 書 集

The ABCC Technical Reports provide the official bilingual statements required to meet the needs of Japanese and American staff members, consultants, advisory councils, and affiliated government and private organizations. The Technical Report Series is in no way intended to supplant regular journal publication.

ABCC 業績報告書は、ABCC の日本人および米人専門職員、顧問、評議会、政府ならびに民間の関係諸団体の要求に応じるための日英両語による記録である。業績報告書集は決して通例の誌上発表に代るものではない。

THE EPICENTERS OF THE ATOMIC BOMBS
I. AN ESTIMATE BASED ON THERMAL RAY SHADOWS
NAGASAKI

原子爆弾の炸裂点

1. 熱線による残影に基づく推定, 長崎

HARRY H. HUBBELL, Jr., Ph.D.¹

EDWARD T. ARAKAWA, Ph.D.¹

SHOGO NAGAOKA² 長岡省吾

SHOICHI UEDA³ 上田尚一

SUNAO TANAKA³ 田中 直

Approved 承認 24 March 1966



ATOMIC BOMB CASUALTY COMMISSION
HIROSHIMA AND NAGASAKI, JAPAN

A Cooperative Research Agency of
U.S.A. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES · NATIONAL RESEARCH COUNCIL
and
JAPANESE NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH OF THE MINISTRY OF HEALTH AND WELFARE

with funds provided by
U.S.A. ATOMIC ENERGY COMMISSION
JAPANESE NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH
U.S.A. PUBLIC HEALTH SERVICE

原爆傷害調査委員会

広島および長崎

米国学士院 - 学術会議と厚生省国立予防衛生研究所
との日米共同調査研究機関

米国原子力委員会, 厚生省国立予防衛生研究所および米国公衆衛生局の研究費による

*Oak Ridge National Laboratory, Consultant to ABCC¹; Former Director, Hiroshima Peace Memorial Museum, Consultant to ABCC²; and
Department of Statistics, ABCC³*

Oak Ridge National Laboratory 保健物理学部, ABCC 顧問¹, 広島平和記念資料館前館長,
ABCC 顧問², および ABCC 統計部³

CONTENTS 目 次

Introduction 緒 言	1
Data 資 料	2
Calculation of the Hypocenter 爆心地点の算定	3
Calculation of the Height of the Burst 炸裂点の高度算定	7
Discussion 考 察	8
Summary 要 約	11
References 参考文献	11
Appendix 付 録	12

FIGURES 図

1. Coordinates used in calculating hypocenter 爆心地点の算定に用いた座標	5
2. Perpendicular distance d_i from shadow line extended to mean hypocenter vs distance of point of observation from hypocenter 平均算定値で示した爆心地点から投影延長線に至る垂直距離 d_i と観測点から爆心地点までの距離との関係	8
3. Nagasaki hypocenter area 1945 showing mean shadow areas 平均値によって求めた投影線を示す. 1945年の長崎爆心地区	9

THE EPICENTERS OF THE ATOMIC BOMBS

I. AN ESTIMATE BASED ON THERMAL RAY SHADOWS

NAGASAKI

原子爆弾の炸裂点

熱線による残影に基づく推定, 長崎

INTRODUCTION

To investigate the biological effects of ionizing radiation upon human beings, the survivors of the atomic bombs of Hiroshima and Nagasaki are being studied by ABCC. For significant results, this study requires good radiation dose data on the exposed individuals. A comprehensive dosimetry program is being carried out by the Health Physics Division of the Oak Ridge National Laboratory (ORNL) in collaboration with ABCC. Many of the details have been described elsewhere.^{1,2} Two of the fundamental parameters in calculations of doses to the survivors are the distance of each individual from the burst point and the radiation yield from the explosion. The location of each individual has been documented at ABCC by interviews with the individuals involved. This information, together with that on the position of the source of radiation, is required for an accurate determination of the radiation exposure. Some of the estimates of the radiation yield of the bomb depend sensitively on the location and altitude of the explosion. It is therefore important that the burst point of the Nagasaki atomic bomb be investigated and documented thoroughly.

In Part 1 of this report, the epicenter, or air zero, of the burst point (including the hypocenter or ground zero and altitude) are recalculated from measurements of thermal shadows formed on stone, mostly gravestones, from data on file by one of us (SN).

In Part 2, to be issued later, all available original data on the burst point are reexamined. Careful consideration of the internal consistency of the data studied in Part 1 and a reexamination of those shadows still visible (in 1960-64) leads us to believe that the best estimate of the burst point is to be obtained by a weighted average of all the figures given by the various workers, recalculated where possible from the original data using the best currently available maps and photographs. The reevaluation and the final result are discussed in Part 2.

緒言

電離放射線が人体に及ぼす生物学的影響を調べるため、広島および長崎の原爆被爆生存者の調査が現在 ABCC によって進められている。この調査を意義あるものとするためには、各被爆者について精度のよい推定照射線量の資料を入手する必要がある、広範な線量推定計画が現在 ABCC と提携して Oak Ridge National Laboratory (ORNL) の保健物理学部によって実施されている。この調査計画の詳細については、すでに多くの報告が行なわれている。^{1,2} 被爆生存者の受けた放射線量推定の際の 2 つの基本的な助変数は、炸裂点から各人の被爆地点までの距離と、爆発によって生じた放射線の総量とである。各人の被爆位置については ABCC が被爆者との面接調査によって得た記録がある。この資料は炸裂点の位置に関する資料とともに、各人の受けた照射線量を正確に知るうえに必要な。爆弾の放射線放出総量の推定には、炸裂点の位置および高度に強く依存する面がある。したがって、長崎における原子爆弾の炸裂点を徹底的に調べて記録することが肝要である。

この第 1 報では著者のひとり(長岡)が作った測定記録資料のうち、石、特に墓石に残る熱線によって墓石面に印された残影の測定値に基づいて、炸裂点すなわち空中原点(爆心地点、すなわち地上原点および高度も含む)の再算定を行なう。

のちに発表する予定である第 2 報では、役立ちうるあらゆる炸裂点に関する原資料の再検討を行なう。第 1 報で調べた資料の内容の一貫性をじゅうぶん考慮に入れ、今もなお(1960-64年)残るこれらの残影の再検討を行なった結果、炸裂点の最も正確な推定値は、各研究員によって示された数値のすべてについて、現在入手可能な最も正確な地図および写真を用いて原資料による再計算を行ない、その加重平均を求めることによって得られるという確信を得た。この再評価と最終結果については第 2 報で述べる。

DATA

The general procedure for obtaining measurements of the shadows cast by the thermal rays was the same as that described for Hiroshima.³ However, two factors greatly reduced the amount of available data. First, granite, which formed the best permanent shadows, is used very little in Nagasaki. Andesite is more common and forms measurable shadows, but the total number found was still small compared to those in Hiroshima. Second, many of the shadows were located in graveyards, but there were far fewer of these close to the hypocenter in Nagasaki than was the case in Hiroshima.

The shadow edges could be discerned by several techniques. Thin paper could be laid on the stone and a soft pencil rubbed over it to bring out the polished and burned regions, as described previously.³ Alternatively, baby powder (Johnson's, another brand didn't work) was sprinkled on the stone, and the surface wiped gently with a rag. The powder remained only in the burned, roughened area. On certain stones the edge was brought out by smearing the surface with grease, sprinkling with powder, and then wiping with a rag. Again, only the rough surface would retain the powder. A study of pictures of shadows observed in this way quickly convinces one of the irregular nature of the shadow edge, and the extreme difficulty of measuring the angle between the edge and a reference direction with any precision.

Certain components of the andesite usually turned black from the heat, so many of the shadows were quite visible. How much of this black material was weathered off before the measurements is, of course, unknown. The shadow edges were also somewhat irregular, like those on the granite.

The original data on shadow angles were taken with a small magnetic compass, graduated every 5° . For the hypocenter series they were recorded as shown in the Appendix (e.g., NW 57). The example is interpreted as $\theta_i = 57^\circ$ west of magnetic north.

The elevation angles were measured with a small clinometer in degrees above horizontal, and are recorded in the Appendix. No corrections were made to them.

Points 14, 15 and two of the readings at point 9 (Appendix page 13) are considered unreliable and were omitted in calculation. The readings and the reasons for omitting them are noted in the Appendix. They are recorded here in case later studies reveal ways of correcting them.

資料

熱線による残影の測定値を求める方法は、広島について述べられたものとだいたい同じである。³ しかし、次の2つの要因のため資料の入手量が非常に少なかった。まず、長崎では残影が最も長く残る花崗岩がほとんど使われていない。安山岩が普通用いられていて、これによっても残影の測定は可能であるが、その総数は依然として広島に比べて少ない。次に、残影はその多くが墓地で求められたのであるが、広島に比べて長崎では爆心地付近の墓地の数が非常に少なかった。

残影の境界線はいくつかの方法で見分けられる。参考文献3に述べられているように、石の上に薄い紙を置き柔らかい鉛筆でその上をこすれば、磨かれた部分と焼けた部分の区別が現われる。あるいはまた、Johnsonのベビーパウダー（他の商標のものでは効果がない）を石の上に振りかけ、その上を布切れで静かにふく。パウダーは焼けてあらかなくなった部分にだけ残る。ある石ではその表面に油脂を塗り、パウダーをまいて布切れでふく。この場合も粉は焼けて表面のあらかなくなった面にだけ残る。このようにして観察された残影を検討すれば、その残影の境界線が不規則であること、ならびにこの境界線と熱線の方が作る角度を正確に測ることがきわめて困難なことが容易に了解できる。

安山岩の成分の中には、熱にあえば普通黒化するものがあるので、その多くはごく容易に認められる。この黒化した物質が測定前にどの程度風蝕によって消えていったかはもちろん不明である。この残影の境界線も花崗岩の場合と同様やや不規則であった。

残影の角度に関する原資料は、5度ごとに目盛りを付けた小さい地質学用傾斜儀（クリノメーター）を用いて収集された。爆心地点の推定にあたっては、たとえば付録に示すとおり、NW57のような形式で記録された。これはすなわち、 θ_i = 磁北の西57度の意味である。

仰角については小測斜計を用いて水平面上の角度を測り、付録にその記録を示した。これにはなんらの修正も加えていない。

地点14および15、ならびに地点9（付録13ページ）における2つの測定値は、信頼性を欠くと考えられたため計算から除外した。その数字および除外の理由はそれぞれ付録の注にあるとおりである。今後の研究でこれを修正する方法がみつけれられた場合のことを考えて、ここにこの記録をとどめる。

The grid coordinates are those of the US Army Map of Nagasaki City, series AMS L902 (1945) No. 138,353. The units are 1000 yards, measured in terms of the 1000 yard world polyconic grid band III N, Zone 'C'. The variation angle between grid north and magnetic north is taken from this map.

In many cases only the central point of the graveyard could be satisfactorily located on the map. Attempts to resurvey several of the graveyards were not successful, because of the difficulty of locating modern bench marks and because of the discrepancies between current maps and the wartime army map on which the data are based. Only a few of the shadows are still visible today.

CALCULATION OF THE HYPOCENTER

The measured angles at each location were first averaged. The average angle and location coordinates were then considered a single datum of unit statistical weight. There were several reasons for using this procedure rather than that used in Hiroshima,³ where each location was given a statistical weight equal to the number of measurements. Any monument may have been moved by the blast or other causes so that a systematic error may be present in all the measurements of shadows on that monument. It was observed that the variance of the measurements on one grave is less than the variance calculated from all the measurements in one cemetery. Repeated measurements on the given monument will not reduce these systematic errors.

The fireball which caused the shadows was really not a point source and may not have been spherically symmetrical. 'The Effects of Atomic Weapons' (p 198)⁴ indicates that the heat radiation which caused the shadows was emitted over the first 3 seconds, with the peak emission occurring at 0.3 seconds, but the curve of radiation vs time shows two peaks, the second being quite broad. The first peak is much higher, but because of its very short duration, the total energy radiated is small compared to that radiated during the second peak (p 188). The fireball had a diameter of 200 m at 0.01 seconds, and at the end of 3 seconds, it had attained a diameter of about 280 m (p 182). Hence the source was far from being a point, as assumed in the Hiroshima report,³ and shadow edges from opposite sides of an object converge away from the fireball. There were not enough shadows to take only pairs from opposite sides of the same monument. The data do not state on which side of the monument the shadow appeared, and many of the shadows are no longer visible, so that the side exposed cannot be determined now.

地図の座標は米陸軍の長崎市地図, AMS L902 (1945) No. 138,353 に示されたものを用いた. 単位は1000ヤードで, "1000ヤード世界多円錐座標, バンドⅢ N, ゾーン 'C'" によって測定したものである. 磁北と地図の北極の角度差はこの地図から求めた.

多くの場合, 地図上に満足にその位置を求めることができたのは墓地の中心地点だけであった. それぞれの墓地の再測定を試みたが, 新しい水準点を定めることの困難性, および現在の地図と, 資料の基礎となった戦時中の軍用地図の間にみられる矛盾のため, 満足な結果は得られなかった. 現在なお識別できる残影はきわめて少数である.

爆心地点の算定

まず各地点での測定角度の平均値を求めた. 平均角度と測定地点座標とを等しい統計的加重を持つ資料とみなした. 広島の花裂点推定の際の各地点の加重にはその地点での測定数を用いたのであるが, この報告ではこの広島の方法³によらないで上記の方法を用いたことには若干の理由がある. どの石碑も爆風またはその他の原因で動いている可能性があり, そのような石碑の残影の計測値にはすべて系統的な誤差が含まれているかもしれない. 1つの墓石の測定値に認められた分散は1つの墓地の全測定値から計算した分散よりも小さかった. 特定の墓石について測定を反復しても, これらの系統的な誤差は減少しない.

残影の源泉とみなされる火球は事実上点ではなく, また左右均斉のとれた球状でもなかったであろう. 「原子兵器の効果」(p 198)⁴によれば, これらの残影を作った熱線は最初の3秒間に放出されたものであって, 0.3秒時にピークに達したとしているが, 経過時間別放出熱線曲線の示すところによればピークは2回あって, 2回目はかなり幅が広い. 1回目のピークの方がはるかに高いが, 時間が短いためエネルギー放出総量は2回目のピーク時放出量に比べて少ない(同, p 188). 0.01秒時の火球の直径は200 mで, 3秒経過時にはこれは約280 mに達している(同, p 182). したがって, 線源は広島の花裂³で仮定されたような点とはほど遠いものであって, 物体の両面にできた残影を延長した場合, その交点は火球とは反対側にできる. 同一墓石の両面に鮮明な残影がある例の数は不十分であった. 資料では墓石のいずれの側に残影が現われていたかを明らかにしておらず, すでに残影の消えたものも多いから, 熱線を受けたのはいずれの側であったか, 今となってはわからない.

Several photographs of bursts of other nuclear devices show fireballs in about the stage mentioned which are not perfectly spherical. Therefore, the shadows in any one vicinity may show a systematic error, differing from that in another location some distance away, since the edge of any particular shadow tends to lie along such a direction that a substantial part of the radiating area of the fireball is visible from the burned zone. Furthermore, nearby surfaces may have reflected considerable radiation, and thus distorted the shadows. The assumption was made in this work that the average shadow line points toward the apparent mean heat center of the fireball, but the apparent center may well have been different when viewed from different places.

This averaging procedure was equivalent to assuming that the location coordinates of each graveyard or other measurement point were known much more accurately than the shadow angles, because in the final calculation unit statistical weight is given to each location and to its average shadow angle, regardless of the number of shadows averaged.

The shadow azimuth angles β_i are calculated from the data in the Appendix in degrees clockwise from grid north to the extension of the shadow edge toward the hypocenter, as shown in Figure 1. According to the map (AMS L902 No. 138,353) grid north is $1^\circ 33'$ east of true north. Magnetic north in 1945 was $\delta = 6^\circ 30'$ west of grid north, and δ is treated as a positive number. No correction has been made for the annual change in magnetic variation, since the change is small, and it is not known when the shadows were measured. The angles β_i were calculated as follows:

For angles	NE:	$\beta_i = \theta_{NE} - \delta$	} (1)
角度	北東	$\beta_i = 180 - (\theta_{SE} + \delta)$	
	SE:	$\beta_i = 180 + (\theta_{SW} - \delta)$	
	南東	$\beta_i = 360 - (\theta_{NW} + \delta)$	
	SW:		
	南西		
	NW:		
	北西		

The location of the hypocenter was determined using a least squares method and minimizing the quantity

$$\Lambda_1 = \sum d_i^2 \quad (2)$$

where d_i is the perpendicular distance from a mean shadow line to the hypocenter (x,y), as shown in Figure 1. The distance (d_i) was determined in

他の核爆発実験例の写真には、先に述べたように完全な球形をとらない時期の火球を示したものが若干ある。このような場合、ある地点における残影には、それから若干離れた他の地点の残影にみられるものとは異なる系統的な誤差が現われるであろう。その理由は、残影の境界線は火球の熱放射領域の大半が焼かれた区域からみえる線に沿って現われる傾向を持つからである。さらに付近の物体の表面からも相当多量の熱線の反射があり、それによって残影にひずみができているかもしれない。したがってこの研究では、平均値で求めた残影の線は平均値で求めた火球熱源の中心を指向するものと仮定したが、異なる方向からみた線源の中心は当然それぞれ異なっていたものと考えられる。

この平均によって求める方法は、各墓地ないし測点の位置を示す座標が残影の角度よりもはるかに正確に決定できるものと仮定するに等しい。なぜなら、最終的計算においては各位置および残影の平均角度に対し、残影の数の平均とは関係なく統計的単位加重が行なわれるからである。

残影の方位角 β_i は、図 1 に示すように、付録の資料に基づき、地図の北極から爆心地点の方向へ右回りに投影線の延長が作る角度を算出したものである。地図 (AMS L902 No. 138,353) によれば、地図の北極は真の北から $1^\circ 33'$ 東寄りに位する。1945 年における磁北は、 δ = 地図の北極の西 $6^\circ 30'$ であって、 δ は正の数として扱われている。年々の磁気変動による変化については、その変化の度が小さく、残影が測定された時期も明瞭でないため、なんらの修正も加えなかった。角度 β_i は次の式によって求めた。

爆心地点の推定位置は最小 2 乗法により、次の式の値を最小にするように求めた。

この場合 d_i は図 1 に示すように爆心地点 (x, y) からの平均投影線に至る垂直距離である。距離 d_i は地図の

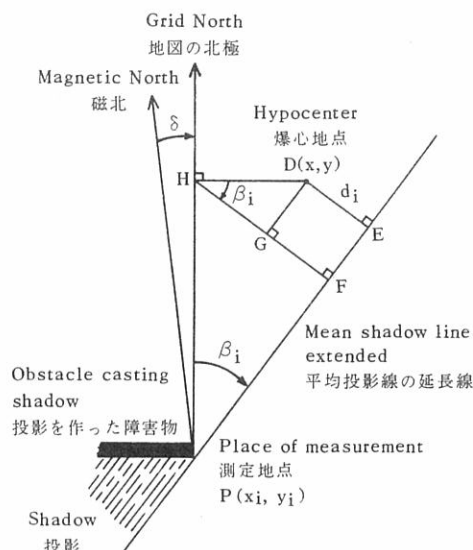


FIGURE 1 COORDINATES USED IN CALCULATING HYPOCENTER

図1 爆心地点の算定に用いた座標

terms of the angle of the mean shadow line measured clockwise from grid north (β_i), the coordinates of the place of measurement (x_i, y_i) and the coordinates of the hypocenter (x, y) as

北極から右回りに測った平均投影線の作る角度 β_i , 観測地点の座標 (x_i, y_i), および爆心地点座標 (x, y) に基づき次の式によって求めた.

$$\left. \begin{aligned} d_i &= ED = GF = HF - HG \\ HF &= PH \sin \beta_i = (y - y_i) \sin \beta_i \\ HG &= HD \cos \beta_i = (x - x_i) \cos \beta_i \end{aligned} \right\} (3)$$

where ED, GF, etc. are line segments indicated in Figure 1. Therefore

この場合 ED, GF は図1に示した線の部分である. したがって,

$$d_i = (y - y_i) \sin \beta_i - (x - x_i) \cos \beta_i \quad (4)$$

This is the normal form of the equation of the line, and the equations are unchanged in form in any of the four quadrants, or for shadow lines pointing either to the left or to the right of the hypocenter. Equation (4) was substituted in the equation (2) for Λ_1 and the minimum condition was introduced by setting the partial derivatives of Λ_1 with respect to x and y each equal to zero. The resulting equations were solved simultaneously to give the hypocenter coordinates:

これは標準的な線の公式であって, すべての象限において, すなわち爆心地点の左右いずれの側に投影線がかけてもこの式は不変である. Λ_1 について式(4)を式(2)に代入し, x および y に関する Λ_1 の偏導関数をともにゼロに等しいとすることによって Λ_1 を最小にする点を求める式を作った. こうして得た連立方程式を解いて爆心地点の推定座標を求めた.

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{C(P - R) - B(Q - S)}{AC - B^2} \\ y &= \frac{B(P - R) - A(Q - S)}{AC - B^2} \end{aligned} \right\} (5)$$

where ただし,

$$\left. \begin{aligned} A &= \sum \cos^2 \beta_i \\ B &= \sum \sin \beta_i \cos \beta_i \\ C &= \sum \sin^2 \beta_i \\ P &= \sum x_i \cos^2 \beta_i \\ Q &= \sum x_i \sin \beta_i \cos \beta_i \\ R &= \sum y_i \sin \beta_i \cos \beta_i \\ S &= \sum y_i \sin^2 \beta_i \end{aligned} \right\} (6)$$

The hypocenter coordinates determined by this method, in terms of the map mentioned are: $x = 1293.644$; $y = 1065.927$. At ABCC it is customary to drop the first two digits of each coordinate, viz: 93.644×65.927 . As mentioned above, the unit is 1000 yards.

この方法により求めた爆心地点の推定座標を地図上に示せば次のとおりである. $x = 1293.644$, $y = 1065.927$ ABCCでは各座標を示す数字の最初の2桁は省略するのが通例である. たとえば 93.644×65.927 のように. 座標の単位は前記のとおり1000ヤードである.

The individual values of d_i were calculated; and the average value, \bar{d} , from the equation

それぞれの d_i 値を算出し, 平均値 \bar{d} を次の式により求めた.

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^m d_i / m = 0.074 \quad (7)$$

where m is the number of places where measurements were made and used, and d_i is the absolute value of d_i , neglecting the sign.

ただし, m は使用した観測地点の数, d_i は d_i の絶対値を示す.

If one defines the probable error, P.E. \bar{d} , in this average distance \bar{d} as

この平均距離 \bar{d} の確率誤差 P. E. \bar{d} を次のとおり定義すれば,

$$P.E.\bar{d} = 0.6745 \left(\frac{\sum_{i=1}^m (d_i - \bar{d})^2}{m(m-1)} \right)^{1/2} \quad (8)$$

then we obtain

これにより次の数値が得られる

$$P.E.\bar{d} = \pm 0.0074 = \pm 6.8 \text{ meters.}$$

メートル

Two possible interpretations might be given to the quantity \bar{d} . On the one hand it might be concluded that it represents a measure of the error in this hypocenter, as determined from the internal consistency of the data. On the other hand, the radius \bar{d} might be interpreted as an indication of a projection of the radius of the fireball. Since average angles θ_i were used, which in many cases probably include shadows both on the left and on the right of the obstructions casting them, another calculation of \bar{d} using each shadow angle measurement independently would be required to make such an interpretation. This will be considered further in Part 2.

CALCULATION OF THE HEIGHT OF THE BURST

The measurements for determining angles of azimuth were made on the shadows of vertical objects, while the measurements of elevation angle to determine the height of the burst were made on the shadows of horizontal objects. These two types of shadows usually did not appear on the same object. Therefore, the height values were calculated from the elevation angle measurements assuming that the calculated mean hypocenter location on the ground was correct:

$$H_i = H_{oi} + R_i \tan T_i \quad (9)$$

where H_i is calculated height of the burst above the hypocenter, H_{oi} is the altitude of the observation point above the hypocenter, R_i is the horizontal distance from the observation point to the mean hypocenter, T_i is the angle of elevation from the true horizon at the stone to the center of the fireball, as measured from the shadow. The average value of H_{oi} was used where a range was given in the original data, found in the Appendix.

The elevation angles listed in the Appendix were averaged at each location, as was done in the hypocenter calculation. The burst height values were obtained from equation (9), and the average value was

$$\bar{H} = 500 \pm 9 \text{ meters } \text{メートル}$$

The error stated is the probable error, 0.6745σ calculated from

$$\sigma_{\bar{H}}^2 = \frac{\sum (H_i - \bar{H})^2}{(n-1)n} \quad (10)$$

where n is the number of locations used, here 27.

この \bar{d} 値に対しては2通りの解釈が考えられる。一方では、資料の内的一貫性に基づいて得た爆心地点における誤差測定の数値であると考えられる。他方、この \bar{d} の半径は火球の対応する半径の投影であると解釈することもできるであろう。ここではその多くが障害物の左右両側からの投影を含むと考えられる平均角度 θ_i が使用されているから、おのおのの投影角度計測値を別々に用いて得た \bar{d} の計算値は独立にそのような説明を付け加えるために必要であろうが、この点については第2報においてあらためて考察する。

炸裂点の高度算定

方位角は直立物の残影の計測によって決定したが、他方炸裂点の高度決定に必要な仰角の計測には水平物体の端の残影を利用した。これら2種の残影は普通同一物には現れない。したがって、平均算定値によって示した爆心地点を正しいものと仮定して、高度は仰角に基づいて次のように算出した。

ただし H_i は炸裂点高度、 H_{oi} は爆心地点平面からの観測点までの高度、 R_i は観測点から、上記の方法で求められた爆心地点までの水平距離、 T_i は測定に用いた石の処在地点における真の水平線から火球の中心への仰角を表わす残影の角度である。付録の地面の海拔標高欄の原資料に一定範囲が示されているものについては、 H_{oi} はその平均値を用いた。

付録に示す仰角については爆心地点算定の際と同様各観測点ごとに平均値を求めた。炸裂点高度は(9)の式によって算出し、次の平均値を得た。

誤差は確率誤差であって、次の式から計算された 0.6745σ である。

ただし、 n は計算に用いた観測地点の数であって、ここでは27である。

DISCUSSION

It might appear that the system for finding the location of the hypocenter gives too large a weight to observations made at large distances, because a small error in shadow angle at a distant point would produce a much larger error in the perpendicular distance to the mean hypocenter, d_i , than the same error at a near point. This is not true in these data, as a careful study of Figures 2 and 3 will show. In Figure 2 the perpendicular distance d_i is plotted as a function of the distance R_i to the mean hypocenter. There is no correlation between the quantities, whereas if the assumption mentioned were correct, one would expect d_i to increase with R_i . It may be speculated that the reason is related to the smaller angular size of the fireball when it is viewed from a larger distance. The apparently smaller fireball would produce a shadow with a sharper edge and decrease the error in angle measurement.

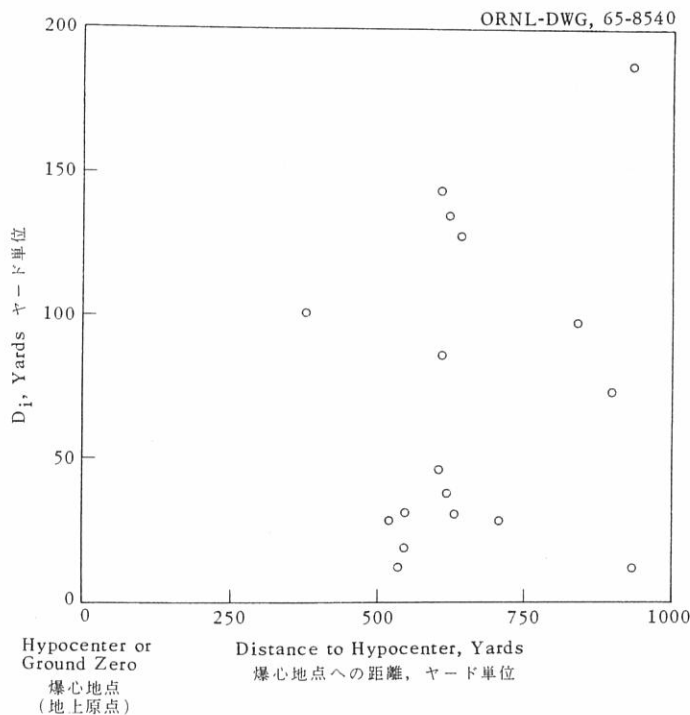


FIGURE 2 PERPENDICULAR DISTANCE d_i FROM SHADOW LINE EXTENDED TO MEAN HYPOCENTER vs DISTANCE OF POINT OF OBSERVATION FROM HYPOCENTER

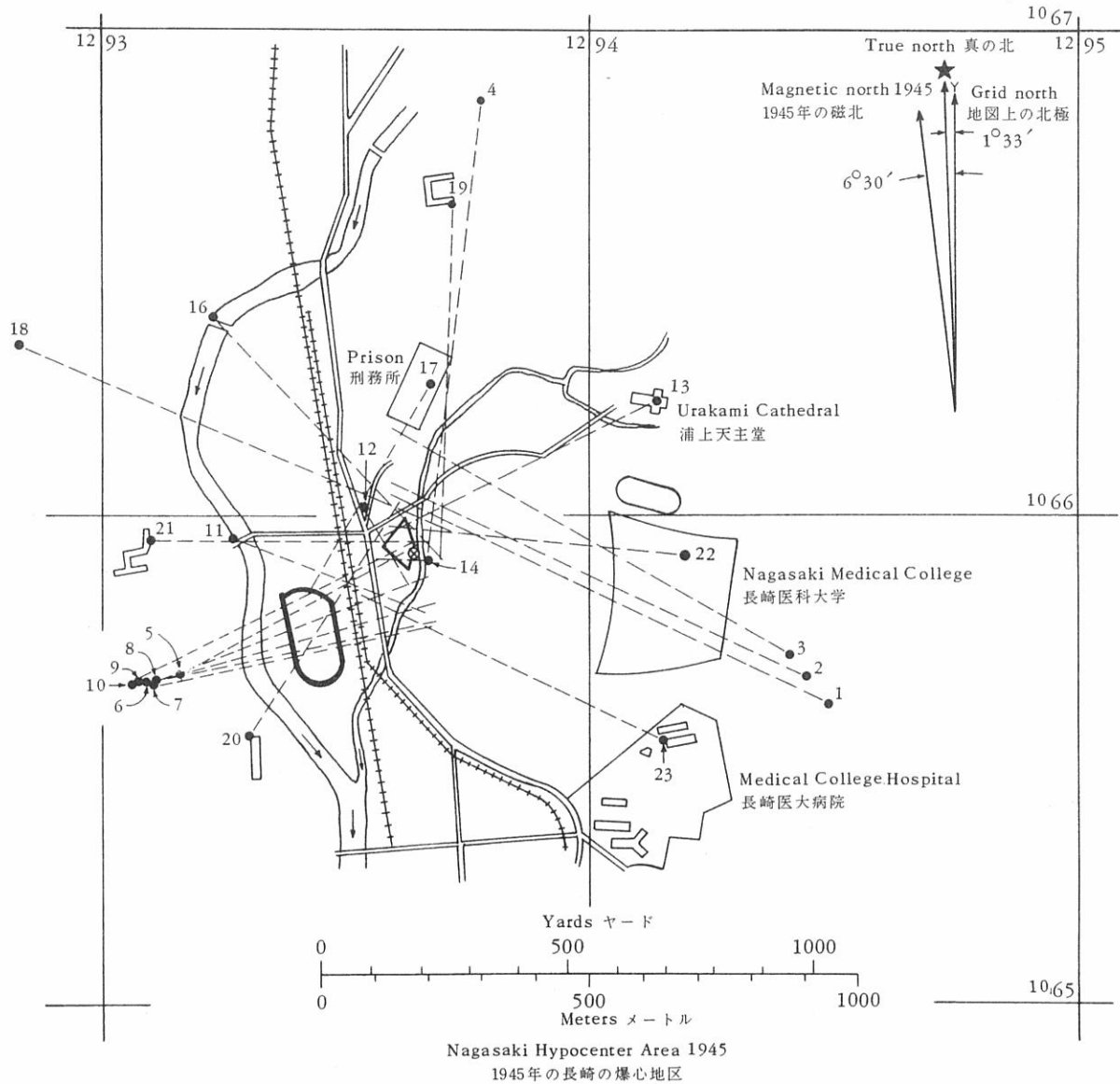
図2 平均算定値で示した爆心地点から投影延長線に至る垂直距離 d_i と観測点から爆心地点までの距離との関係

On the other hand, it does seem that the method of minimizing the sum of the squares of the perpendicular distances d_i gives excessive weight to the observations with large errors since these contribute so much more to the sum than those with small errors. The justifications for using the method are that mathematically it is simple and straightforward and that if the errors are truly random, the measure-

考 察

爆心地点から平均算定値が示す方向への垂直距離 d_i については、遠距離の場合の投影角度のわずかな誤差は、近距離に比べてはるかに大きな誤差をもたらすと考えられるから、この爆心地点算定方式では遠距離で行なわれた観測に過大な加重が用いられているようにみえるであろう。しかし、図2および図3をよく調べてみればわかるように、この資料の場合はそうでない。図2においては、垂直距離 d_i を平均算定値が示す爆心地点までの距離 R_i の関数としてグラフに示した。2つの数値の間に相関関係は認められないが、もし上記の仮定が正しいとすれば、 d_i は R_i 値の増加につれて増加するはずである。それがそうでない理由は、火球を遠距離からみる場合はその角度が小さくなるという事実に基づくものと考えてよいであろう。小さい火球が作る残影の境界線は鮮明となり、角度測定上の誤差も少なくなるであろう。

他方、垂直距離 d_i の二乗和を最少にする方法では、誤差の大きい観測値は誤差の小さい観測値に比べて二乗和へ大きく影響するので、観測値に過大な加重をもたらすと考えられる。この方法の長所は、数学的計算が簡単でただちに結果が出ること、およびもし誤差が実際に無作為的に現われるとすれば、計測値は平均値を中心に正規分



⊗ Hypocenter calculated in this report.
本報告において算定した爆心地点

FIGURE 3 NAGASAKI HYPOCENTER AREA 1945 SHOWING MEAN SHADOW AREAS
図3 1945年の長崎爆心地区。平均値によって求めた投影線を示す。

ments would exhibit a Gaussian distribution about the mean, and it can be shown that the least squares method then gives the best estimate of the mean. However, if systematic errors exist in the data, as seems likely, then the second argument loses validity.

Other minimal procedures were considered, such as minimizing the mean square angle between the observed shadow line and a line to the hypocenter, or the sine or the tangent of this angle. The mathematical complexities of the resulting equations are considerably greater in these alternative methods, and there seems to be no theoretical advantage in using any of them.

At the time the measurements were made, the importance of high precision was not fully realized, and in particular, the original data do not indicate whether the burned area on the stone is to the left or right of the shadow edge as one faces the hypocenter (for above or below for elevation angle measurements). Since the fireball was about 280 m in diameter at the time the shadows were formed,⁴ there is an appreciable divergence in the shadow edge lines. This divergence could be detected in some of the data by plotting a number of observations of a given angle in one small region as a function of the angle. A double humped curve suggested that perhaps shadow edges had been measured on both sides of an object. The divergence of the edge lines could then be estimated and the apparent size of the fireball calculated. This size is considerably smaller than the true maximum dimensions of the fireball since an appreciable fraction (about 0.3) of the fireball must 'shine' on the stone to burn it. An effort was made to infer from the data whether the burned area for each shadow was to the left or right of the shadow edge (or above or below for elevation angles), and then to correct the azimuth or elevation angle by half the apparent angular diameter of the fireball. This diameter was inferred from the data in the same way. The procedure became so arbitrary and subjective that little confidence could be placed in the resulting hypocenter, and the correction was abandoned. A more sophisticated calculation from these data using statistical principles is in progress and will be reported in Part 2.

Other values for the hypocenter and burst height calculated from these same data have been reported. However, some arithmetic errors have been discovered in these earlier calculations.

布を示し、最小二乗法により平均値が最もよく推定できることにある。ただし、資料には系統的な誤差が存在することも考えられるから、そのような場合にはこの効果は失われる。

このほか観測された投影線と爆心地点を指す線とが作る角度の平均二乗和やこの角の正弦や正接の数値を最小にする方法も考慮した。これらの方法では、それに用いる式の計算が数学的に著しく複雑になり、いずれの方法を用いても理論的に益するところはないように思われる。

測定が行なわれた当時は、精度を高く保つことの重要性はじゅうぶんに認識されておらず、特に原資料では石の焼けた部分が爆心地点に向かって残影の右側に属するのか左側に属するのか(あるいは測定された仰角の上に属するのか下に属するのか)が明らかでない。投影時の火球の直径は約 280 m であったから、⁴ この残影の境界線にはいろいろ違いが現われる。この違いは、ある資料では一小区域の特定の角の観測数をその角度の関数としてグラフに描くことによって発見できる。二峯型曲線は、残影の縁がおそらく対象物の両側で測定されたことを示すものであろう。これによって各種の境界線の推定が可能となり、火球の大きさと考えられるものが算出できる。石を焦がすには火球のかんりの部分(約 0.3)による照射を必要とするから、この算出値は火球に実際に現われた最大径に比べればかなり小さいものである。資料に基づいて、各残影の焼けた面がその残影の境界線の左側に属するか右側に属するか(あるいは仰角の上にあたるか下にあたるか)を推定し、次いで火球の半径とみなされるものにより、方位角すなわち仰角を修正する努力が払われた。直径も同様にこの資料に基づいて推定された。しかし、その方法はきわめて任意的かつ主観的なものとなり、その結果推定された爆心地点には信頼性が乏しく、この修正の試みは中止された。統計学的原理を用いてこれらの資料を基礎に、さらにいっそう高度な計算の試みが現在行なわれているが、これについては第 2 報で報告する。

これら同じ資料に基づいて算出された爆心地点および炸裂点の高度に関する数字がこのほかにも発表されている。しかし、以前に行なわれたこれらの計算には算術的間違いが認められており、正確でない。

SUMMARY

The hypocenter or 'ground zero' and the burst height of the atomic bomb at Nagasaki have been redetermined by statistical analysis of about 300 shadows cast by the thermal rays of the bomb at 21 locations.

In terms of the coordinates of the wartime US Army Map of Nagasaki series AMS L902, No. 138,353, dated August 1945, these coordinates are: $x = 1293.644$ (E - W); $y = 1065.927$ (N - S). The unit is 1000 yards and the coordinates are in terms of the 1000-yard world polyconic grid, band III N, Zone 'C'.

The calculated average burst height above the hypocenter and its probable error were: $H = 500 \pm 9$ meters. The corresponding figures currently in use at ABCC are: $x = 1293.61$; $y = 1065.92$; $H = 490$ meters.

The differences between these and the new values are within the errors of measurement and calculation. The new point is 32 meters from the currently used one.

要 約

長崎の原子爆弾の熱線で生じた残影を21箇所です約300件集め、それらについて統計学的解析を行なって、爆心地点および炸裂点高度をあらためて決定した。

戦時中の米陸軍地図(長崎版 AMS L902, No. 138,353 1945年8月)によれば、座標は次のとおりである。 $x = 1293.644$ (E - W); $y = 1065.927$ (N - S)。単位は1000ヤードで、座標は1000ヤード世界多円錐座標、バンド III N, ゾーン "C" による。

計算された平均炸裂点の高度とその確率誤差は $H = 500 \pm 9$ メートル。現在 ABCC で用いている数値はそれぞれ下記のとおりである。 $x = 1293.61$; $y = 1065.92$; $H = 490$ メートル。

上記の数値と新しい数値の差異は、測定および計算の誤差範囲内にある。新しい炸裂点は現行の点から32メートル離れている。

REFERENCES





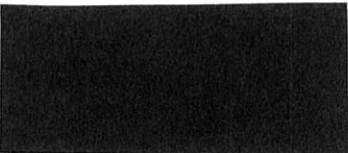




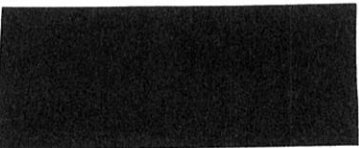











参考文献

1. RITCHIE RH, HURST GS: Penetration of weapons radiation: Application to Hiroshima-Nagasaki studies. Health Phys 1:390-404, 1959
(核兵器放射線の浸透: 広島および長崎の調査への適用)
2. ARAKAWA ET: Radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivors. New Eng J Med 263:488-93, 1960
(広島および長崎被爆生存者に関する放射線量測定)
3. ARAKAWA ET, NAGAOKA S, et al: Determination of the burst point and hypocenter of the atomic bomb in Hiroshima. ABCC TR 12-59
(広島における原子爆弾の炸裂点および爆心地点の決定)
4. Los Alamos Scientific Laboratory: The Effects of Atomic Weapons. Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1950. pp 182, 188, 198
(原子兵器の効果)

APPENDIX

付録

INDIVIDUAL MEASUREMENTS ON SHADOWS FOR THE LOCATION OF THE HYPOCENTER
爆心地点の所在決定に用いた投影の各計測値

Location 観測地点	Coordinates 座標	Kind of Stone* 石の種類	Altitude Above Sea Level 海拔標高 m	Bearing to Magnetic North 磁北に対する方位 θ_i (°)
1 Sakamoto-North Graveyard 坂本北墓地	94.48 x 65.60			
A. 		Gr	60-70	NW 57 58 60
B. 		Gr		NW 61 62
C. 		Gr		NW 55
D. 		An		NW 53 54 55
2 Sakamoto-North Graveyard 坂本北墓地	94.44 x 65.66			
A. 		Gr	60-70	NW 61 61 61
B. 		An		NW 55 55 55
C. 		Gr		NW 58
D. 		Gr		NW 57 57 58
E. 		An		NW 60
3 Sakamoto-North Graveyard 坂本北墓地	94.40 x 65.71			
A. 			60-70	NW 60
B. 		An		NW 60
C. 		Gr		NW 56 57 57 58 58
D. 		An		NW 37 38
4 Graveyard NNE of Yamazato Grammar School 山里小学校の北北東墓地	93.77 x 66.85			
A. 		Gr	30-40	SW 15 16 17 17
B. 		Gr		SW 13 13 14
C. 		Gr		SW 10 11 14 17 18
D. 				SW 10 11 12 12
5 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地	93.17 x 65.68			
A. 		An	10-20	NE 50 58 70 72
B. 		An		NE 72 72 72 73 74
6 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地	93.09 x 65.68			
		An	10-20	NE 80 82
7 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地	93.10 x 65.66			
		An	10-20	NE 81 88

*Gr = Granite An = Andesite
花崗岩 安山岩

Location 観測地点	Coordinates 座標	Kind of Stone 石の種類	Altitude Above Sea Level 海拔標高 m	Bearing to Magnetic North 磁北に対する方位 $\theta_i(^{\circ})$
8 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地 [REDACTED]	93.10 x 65.67	An	10-20	NE 72 80
9 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地 [REDACTED]	93.08 x 65.67	An	10-20	NE 82 84 86 88
10 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地 [REDACTED]	93.07 x 65.67	An	10-20	NE 70
11 Urakami-River Yana-Bridge 浦上川梁橋	93.27 x 65.96		<10	SE 40 60 70 80
12 Oka-machi Monument 岡町記念碑	93.54 x 66.03		<10	SE 18 20 29
13 Urakami Cathedral 浦上天主堂	94.13 x 66.23		10	SW 68 69 70 70 73 74
14 East of Peace Park* 平和公園東方	93.65 x 65.91		<10	NW 82 84*
15 Yachiyo-machi gas tank** 八千代町(ガス・タンク)	94.25 x 63.83		<10	NE 14 16 17 18 19**
16 Shimo-ohashi 下大橋	93.25 x 66.40		5	SE 28 40 42 36
17 Oka-machi prison 岡町(刑務所)	93.66 x 66.23		20	SW 20 40 50
18 Shiroyama-machi Gokoku-shrine 城山町(護国神社)	92.83 x 66.35		30	SE 42 44 60 62 64 65 68 70

*Bridge post east of Peace Park. This post was very close to the hypocenter, and the top is burned and flaked off. The sides are undamaged. The angle measurement is considered unreliable, and was omitted in calculation.









平和公園東方の橋の柱。この柱は爆心地のすぐそばにあって、頭部が焼けて剥離が起きている。側面には損傷はない。角度の測定を行っても信頼性を欠くと思われたため計算から除いた。

**This reading was considered unreliable because the compass was probably deflected by the large mass of steel in the gas tank. It was omitted in calculation.

ガス・タンクには多量の鋼材が用いられているので、おそらく羅針儀にひずみが現われていたものと考えられるから、この測定値には信頼性がない。したがって計算から除いた。

Location 観測地点	Coordinates 座標	Altitude Above Ground 地表からの高さ	Altitude Above Sea Level 海拔標高 m	Bearing to Magnetic North 磁北に対する方位 $\theta_i (^{\circ})$
19 Yamazato Grammar School 山里小学校 Third floor 三階	93.70 x 66.63	8.3	12	SW 6 7 7 8 8 10 11 12 12
20 Chinzei Middle School 鎮西中学校 First floor 一階	93.30 x 65.54	7	15	NE 35 37 37 38 39 40 40 42 43 44
21 Shiroyama Grammar School 城山小学校 A. First floor 一階 B. Top of building 屋上	93.10 x 65.95	4.4 12.6	10	SE 80 80 80 81 81 82 83 85 85 SE 81 81 82 87 86 86 84
22 Medical College North Corner 長崎医科大学(北隅の室) Second floor 二階	94.19 x 65.90			NW 74 75 76 79 82
23 Medical College Hospital 長崎医科大学付属病院 A. Second floor 二階 B. Top of building 屋上	94.15 x 65.53	4.5 8.5	10-20	NW 54 55 56 58 NW 60

INDIVIDUAL MEASUREMENTS FOR THE DETERMINATION OF THE ALTITUDE OF BURST
炸裂点の高度決定に用いた各計測値

Location 観測地点	Coordinate 座標	Kind of Stone 石の種類	Altitude of Ground Above Sea Level 地面の海拔標高 m	Elevation Above Horizontal 水平線上の仰角 $T_i (^{\circ})$
1 Sakamoto-North Graveyard 坂本北墓地 A.  B.  C. 	94.48 x 65.60	Gr Gr An	60-70	22 25 26 27 33 35 35 37 32 32 34
2 Sakamoto-North Graveyard 坂本北墓地 A.  B.  C.  D.  E. 	94.44 x 65.66	Gr An Gr Gr An	60-70	27 31 31 33 39 39 46 45 45 49 50 39 43 43 48 53 21

Location 観測地点	Coordinate 座標	Kind of Stone 石の種類	Altitude of Ground Above Sea Level 地面の海拔標高 m	Elevation Above Horizontal 水平線上の仰角 T _i (°)
3 Sakamoto-North Graveyard 坂本北墓地	94.40 x 65.71			
A. [REDACTED]			60-70	21 21
B. [REDACTED]		An		38 38 40
C. [REDACTED]		Gr		24 28 28 31 31 32
D. [REDACTED]		An		21 23 23
4 Graveyard NNE of Yamazato Grammar School 山里小学校の北北東墓地	93.77 x 66.85			
A. [REDACTED]		Gr	30-40	22 24 26 28 33 34 37
B. [REDACTED]		Gr		35 35 35 36
C. [REDACTED]		Gr		27 27
5 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地	93.17 x 65.68			
A. [REDACTED]		An	10-20	39 40 50 55
B. [REDACTED]		An		36 38 39 44 46
6 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地	93.09 x 65.68			
[REDACTED]		An	10-20	39 40 45 50
7 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地	93.10 x 65.66			
[REDACTED]		An	10-20	40 41 43 48 50
8 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地	93.10 x 65.67			
[REDACTED]		An	10-20	40 41 50 60
9 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地	93.08 x 65.67			
[REDACTED]		An	10-20	39 40 41 42 60 65* 70*
10 Shiroyama-Machi Graveyard 城山町墓地	93.07 x 65.67			
[REDACTED]		An	10-20	40 42 45 52
11 Urakami-River Yana-Bridge 浦上川梁橋				
A.	93.27 x 65.96		<10	44 53 54 56 58 58 60 61 63

**Readings considered unreliable because of the large deviations from the readings at the same place. The burst altitudes calculated from these two angles deviate from the average by more than three times the probable error. They were omitted in the final calculation.*

同一地点における計測値でありながら偏差が大きいため、信頼性を欠くものと考えられた。これら2つの角度に基づいて算定した炸裂点の高度には、平均値に対して確率誤差の3倍以上の偏差が認められた。これらは最終計算から除いた。

Location 観測地点	Coordinate 座標	Altitude Above Ground 地表からの高さ	Altitude of Ground Above Sea Level 地面の海拔標高 m	Elevation Above Horizontal 水平線上の仰角 T _i (°)
B.	93.295 x 65.965			44 47 50 54
C.	93.30 x 65.97			55 56 56
D.	93.310 x 65.975			46 49 51 54 55 56 63
E.	93.285 x 65.945			43 43 49 55 56 57 58 61 65
F.	93.290 x 65.955			52 55 67
16 Urakami-River 浦上川 Shimo-ohashi 下大橋	93.25 x 66.40		5	38 39 40 40 41 41 42 42
19 Yamazato Grammar School 山里小学校	93.70 x 66.63			
A. Third floor 三階		8.3	12	32 32 34 35 35 36 36 40
B. Top of building 屋上		12.3		32 35 38 39 40 41
20 Chinzei Middle School 鎮西中学校	93.30 x 65.54			
First floor 一階		7	15	40 42 43 45 47 49 50
21 Shiroyama Grammar School 城山小学校	93.10 x 65.95			
A. First floor 一階		4.4	10	41 42 42 43 45 48
B. Top of building 屋上		12.6		40 40 42 43 43 44 45 47 50 51
22 Medical College North Corner 長崎医科大学(北隅の室)	94.19 x 65.90		20-30	
A. Second floor 二階		4.5		38 38 39 40 40 40
B. Third floor 三階		8.5		37 37 37 38 39 39 40 40 40
C. Top of building 屋上		14.0		37 37 38 38 38 39 40 40 41
23 Medical College Hospital 長崎医科大学付属病院	94.15 x 65.53			
A. Second floor 二階		4.5	10-20	35 36 36
B. Top of building 屋上		8.5		32 32 32 34 35 35 36 37