

ATOMIC BOMB RADIATION DOSE ESTIMATION AT ABCC

ABCCにおける原爆放射線の線量推定

SEYMOUR JABLON, M.A.



ATOMIC BOMB CASUALTY COMMISSION

国立予防衛生研究所－原爆傷害調査委員会

JAPANESE NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH OF THE MINISTRY OF HEALTH AND WELFARE

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。

ATOMIC BOMB RADIATION DOSE ESTIMATION AT ABCC

ABCCにおける原爆放射線の線量推定

SEYMOUR JABLON, M.A.



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

CONTENTS

目 次

Summary	緒 言	1
Introduction	要 約	1
Dosimetry	線量推定	2
Distribution of dose estimates	線量推定値の分布	12
The value of the error parameter	誤差パラメーターの値	19
References	参考文献	41
Appendix:	Relation of variance of hypocenter location to variance of estimated distance from hypocenter	
	付録 爆心地の位置の分散と、爆心地からの推定距離の分散との関係	28
	Plans for the future: Shielding work and the Shielding Section	
	将来の計画: 遮蔽調査および遮蔽調査課	29
	Correlation between distance and dose	
	距離と線量との相関について	39
Table	1. T65 dose estimates by procedure	
表	T65D 線量推定値: 方法別	10
	2. Mean true dose as a function of estimated rad dose in terms of the error parameter	
	推定線量の関数としての平均実際線量: 誤差パラメーター別	16
Figure	1. Air dose curves 空気線量曲線	9
図	2. Mean true dose as a function of estimated dose, Hiroshima, total dose	
	推定線量の関数としての真の平均線量, 広島, 総線量	18
Table	A1. Effect of two kinds of error in dose on assessment of "X" ogenic effect of radiation	
表	放射線"X"影響の評価に及ぼす線量に関する二つの誤差の影響	33
	A2. Differences between <i>L</i> scale values for original dose estimates and review	
	<i>L</i> スケールでみた元の線量推定値と再推定値との差異	35
	A3. Percent distribution of <i>L</i> scale values by distance: Hiroshima, shielding category 6	
	<i>L</i> スケール値の百分率分布: 距離別, 広島, 遮蔽分類群6	36
	A4. Percent distribution of <i>L</i> scale values by distance, after checking, Hiroshima, shielding category 6	
	再検討後の <i>L</i> スケール値の百分率分布: 距離別, 広島, 分類群6	38
	A5. Comparison of discrepancies between two shielding histories and between shielding history and estimate of dose based on distance and shielding configuration	
	二つの遮蔽記録間の差ならびに遮蔽記録と距離および遮蔽状態に基づく線量推定値との差の比較	38
	A6. Correlation between distance from hypocenter (10 m specification) and <i>L</i> scale T57 total dose, by shielding category, distance, and city	
	爆心地からの距離(10m区分)と <i>L</i> スケールT65D総線量との相関: 遮蔽分類・距離・都市別	39
Figure	A1. Percent distribution of log dose by distance, Hiroshima, shielding category (in wood house)	
図	対数線量の百分率分布, 広島, 遮蔽分類(木造家屋内)	37

Approved 承認 15 July 1971

ATOMIC BOMB RADIATION DOSE ESTIMATION AT ABCC

ABCCにおける原爆放射線の線量推定

SEYMOUR JABLON, M.A.

Department of Statistics

統計部

SUMMARY

The methods of A-bomb radiation dose estimation employed at ABCC are described. Consideration is given to questions concerning the accuracy of individual dose estimates. Statistical properties of the dose distributions and estimation procedures are examined and lead to the conclusion that the estimated dose is not a linear function of the true dose, low doses being slightly underestimated and large doses overestimated.

INTRODUCTION

The purpose of this report is to discuss a variety of aspects of dosimetry. The estimated radiation dose is the essential independent variable in ABCC analyses directed at investigation of radiation effects. Since the availability of the T65 dosimetry system in 1968, estimated doses have been used increasingly. Analyses have not only explored the existence of dose-effects, but have, naturally enough, asked further questions about established effects such as: "Is the dose response linear?", and "What is the relative biological effectiveness (RBE) of fission neutrons as compared with gamma radiation?"

The discussion herein makes no pretense at being exhaustive, either as to the topics considered or as to any particular topic. However, it is hoped that it will nevertheless be useful.

要約

ABCCが用いている原爆放射線量測定方法について記述した。個人線量推定値の正確性について考察を加えた。線量分布および推定方法の統計的特徴を検討したところ、推定線量は真の線量の線形的関数ではなく、低線量域ではやや過小に推定され、高線量域では過大に推定されているという結論に達した。

緒言

本報の目的は、線量測定の種々の面について検討を加えることにある。推定放射線線量値は、放射線影響の調査を目的としているABCCの解析における不可欠な独立変数である。1968年にT65D線量推定方式が確立されて以来、推定線量値はますます利用されるようになった。解析では、線量効果関係の存在が検索されたばかりでなく、確定した影響についてはさらに次の質問に対する解答を求めている:「線量反応は線形的であるか。」「ガンマ線に対する分裂中性子の生物学的効果比(RBE)の値は何か。」

この論文では、対象にした項目あるいは他の特定項目について、徹底的に追求するわけではない。しかし、それが有益であろうことを期待するものである。

Keywords: Radiation dosimetry; T65 Dose; Neutrons; Gamma rays; Shielding

The author has drawn heavily on information gained in conversation and by correspondence with our collaborators at Oak Ridge National Laboratory (ORNL), especially John Auxier, Joseph Cheka, and Troyce Jones. However, the author is exclusively responsible for any errors of interpretation or factual statement.

Because much of the following is concerned with errors in dose estimates, I must emphasize here that no criticism is thereby intended of any of the persons whose dedicated effort has gone into the dosimetry program over the years. It is a fact, however, that physical measurements in the real world are always affected, to a greater or lesser degree, by error. Were this not so there would be little need for statisticians, whose principal business it is to try to assess the role of error (usually sampling error) as it affects our ability to draw conclusions about nature from imperfect data. Up to this point of time (1971) we have all been too busy generating numbers to spend very much time coolly assessing just how good they are. However, now that the major part of the task of preparing tens of thousands of individual dose estimates is behind us it is time to review the process, to decide just how much weight the bridge will bear. This document is but a first step in that direction.

DOSIMETRY

General

By a *dosimetry system* we mean a system for calculating estimated doses to the survivors. By an *error in the dosimetry system* we mean an error in the way some or all doses are calculated which arises from inherent error in the formula (for example, such as would follow from a wrongly estimated air dose curve). We distinguish errors in the dosimetry system itself from errors in individual dose estimates which arise because the history that the survivor or a living relative gave to the interviewer was incorrect, or because of a clerical error in coding or transcription.

We shall pay a great deal of attention to errors in dose estimation, both those that may arise from errors in dosimetry and others. However, we must emphasize that we do this not because of any conviction that dose estimates are necessarily any more erroneous than, say, diagnoses made in the clinic, but because some of the kinds of error that can occur have fundamental implications for results that we are aiming at, and can distort apparent

著者は、Oak Ridge National Laboratory (ORNL) の共同研究者、特に John Auxier, Joseph Cheka および Troyce Jones の3氏との対談や文通によって得られた資料を広く引用した。とはいえ、解釈上の誤りあるいは事実の記載に誤りがあれば、それは著者自身の責任である。

本報は主として線量推定上の誤差に関するものであるが、線量調査について多年にわたり献身的な努力をされた方々を批判する意図のないことは強調しておきたい。しかし、現実の世界では、物理学的測定は、程度の大小こそあれ、つねに誤差の影響を受けるものである。そうでなければ、統計解析者の必要性はほとんどなかろう。誤差は不完全な資料を用いて自然現象に関する結論を導き出す能力に影響を及ぼすので、誤差(通常は抽出誤差)の役割を評価することは統計解析者の主要な仕事である。現在(1971年)まで、われわれは資料収集に忙殺されていたために、資料の正確性については冷静に評価する時間が十分になかった。しかし、幾万の個人推定線量を求める作業の主要部分は完了しているので、いまこそ手順を検討し、この橋がどのくらいの重量に耐えうるかを決定すべき時期である。この報告はその試みの第一段階である。

線量推定

総論

線量推定方式とは被爆者の推定線量を算定する方法をいう。線量推定方式における誤差とは、いくつかまたはすべての線量値における誤差で、方程式に内在する誤差から生ずるもの(たとえば、誤って推定した空気線量曲線からもたらされるようなもの)をいう。ここでは、線量推定方式における誤差と、被爆者または生存している縁者が面接調査員に報告した情報における誤差、あるいは符号化または転記作業における事務上の誤りのために起こる個人推定線量値における誤差とを区別する。

われわれは、線量測定および他の要因による線量推定値の誤差に対して大いに注意を払う。その理由については、次の点を強調したい。線量推定値の正確性が、たとえば臨床部門で下された診断の正確性よりも必然的に低いと信ずるがためではなくて、ある種の誤差は、目標としている調査結果に対して根本的な影響を及ぼし、認められたパターンを大きく歪曲することがありうるからである。

patterns in a profound way. Most of the physicians and other analysts at ABCC are well-acquainted with the idea that diagnoses are sometimes erroneous, and it is almost second nature to make appropriate adjustments in conclusions to allow for this. However, there is something so seemingly absolute about a number like 184 rad that the unwary analyst may credit the estimate with more precision than it necessarily has.

Moreover, it is surprising how various are the ways in which error can creep into dosimetry, and more surprising still are the implications of some of these forms of error. The situation is much more complicated than for errors in diagnosis, which are usually of a simple kind: a diagnosis may be missed entirely, or made erroneously, or two different diseases may be confused with each other.

Elements of the Dosimetry System

There are three essential components to the process of estimating the radiation dose received by a survivor:

The free air dose must be known at any point for both neutron and gamma radiation. This is the problem of the so-called "air dose curves";

The effect on the dose of various kinds of structures or natural obstacles in various configurations with relation to the survivor must be known. Such "shielding" usually results in a decreased dose to the survivor from what he would have received had he been totally unshielded, but in some situations can result in "enhancement" of dose rather than the more common "attenuation";

The location of the survivor at the time of the bomb (ATB) must be known, not only as to distance from the hypocenter and elevation, but also his location in relation to structures that were significant as to shielding.

Air Dose Estimates

In order to create air dose estimates, one needs to know:

The output of the explosion in terms of gamma radiation and neutrons;

The rate at which the intensity of each radiation

ABCCにおける医師および解析者のほとんどは、診断には時として誤りのあることを知っており、結論を下すにあたっては、これに対する結論に第二の天性のようにして適当な補正を加えることにしている。しかし、たとえば184 radのような数には一見して絶対的と思われるような何かがあるので、不注意な解析者はその推定値を実際に持っている正確性よりも高く評価することがあるかもしれない。

しかも、誤差が線量測定に介入しうる方法がいかにも多様にあるかということは驚くべきことであり、もっと驚くべきことはこれらの誤差の形式に対する意味付けである。この問題は、診断上の誤りの場合よりも複雑である。診断上の誤りは、普通簡単に分類できる。すなわち診断の完全な見落とし、誤診、二つの疾病の相互混同がこれである。

線量測定方式の要素

被爆者が受けた放射線量の推定過程には次の三つの重要な要素がある。

各地点における中性子線およびガンマ線の無遮蔽空気線量を知る必要がある。これはいわゆる「空気線量曲線」の問題である。

被爆者の周囲にある各種の建造物または自然の障害物の線量に及ぼす影響についても知る必要がある。このような「遮蔽」は、無遮蔽の状態で被曝した場合に比較し、受けた線量を普通減少させるが、特別な状態では普通見られる線量の「減弱」よりむしろ線量の「増強」を招くことがある。

被爆者の原爆時にいた位置を知る必要がある。すなわち、爆心地からの距離や海拔ばかりでなく、有力な遮蔽となった建造物との位置関係を知る必要がある。

空気線量推定値

空気線量推定値を算定するには、次のことを知る必要がある。

爆弾が放出したガンマ線および中性子線量。

ガンマ線および中性子線のおのおのが爆心からの距

changed with increasing distance from the burst point;

The exact location of the burst.

As to the first point, the output of the weapons, an important fact is that the Nagasaki weapon, a plutonium implosion device, was one of a series, some of which were fired under controlled test conditions. The characteristics of this type of weapon are, therefore, known fairly well and we are told that there is little variation in output. Just how much "little" is has not been stated with any precision, but one gains the impression that the physicists believe that $\pm 10\%$ represents the variation that they consider credible.

The best estimates of the ORNL group, at this time, are that the energy yield of the Hiroshima weapon was 12.5 kilotons, and of the Nagasaki weapon, 22 kilotons.¹ As remarked above, the yield in Nagasaki could be fairly well estimated on the basis of tests of similar weapons, but the yield in Hiroshima could be estimated only from theoretical calculations, backed by surveys of physical damage. Notable was the very careful evaluation by Lord Penney of the United Kingdom Atomic Energy Authority of the effects of blast and heat in both cities.² Lord Penney's analysis leaves the reader in little doubt that the total explosive yield in Hiroshima was within 10% of the value 12.5 kilotons.

The Hiroshima weapon, however, was unique, not only in that it was a uranium 235 rather than a plutonium weapon, but also in that the device acted like a gun, in which one subcritical mass was fired against another. Therefore, the critical mass of the Hiroshima weapon was not surrounded by a spherical shell of high explosive end products (rich in nitrogen and hydrogen) as was the Nagasaki critical mass at the instant that the chain reaction was taking place. Furthermore, the critical mass in the Hiroshima weapon was surrounded by more than 6 inches (15 cm) of steel and other heavy materials. These slowed the neutrons down considerably and produced a neutron spectrum predominantly consisting of much lower energy neutrons than most fission devices.

Nitrogen has what is called a "large cross-section" for fission neutrons, that is, there is a high probability that the nitrogen nucleus will capture the neutron, emitting a high energy gamma ray. Many complex processes are going on at the time of the explosion and during the first few seconds there-

離に応じて減弱する割合。

正確な炸裂点。

第一の原爆の出力の問題については、長崎爆弾（プルトニウム爆弾）は一連の爆弾（そのうち、管理のゆきとどいた状態のもとで実験的に爆発させたものもある）の一つであったというのが重要な事実である。したがって、この種の爆弾の特性はかなりよく知られており、出力にはほとんど差異がないといわれている。「ほとんど差異がない」がどの程度のものかについては正確に述べられていないが、物理学者の間では $\pm 10\%$ の差異は信頼しうる値であると考えられているようである。

現在、ORNLの研究班が示した最良の推定値によれば、広島爆弾のエネルギー出力は12.5キロトン、長崎爆弾のエネルギー出力は22キロトンである。¹ 上述のように、長崎爆弾の出力は同様の原爆の実験に基づいてかなり正確に推定できたが、広島の出力は物理的破壊に関する調査成績をもとにして理論的計算を行なって推定されたにすぎない。英国原子力公社のPenney卿が両市における爆風および熱の影響について行なったきわめて慎重な評価は注目に値するものであった。² Penney卿の解析結果では、広島原爆の全出力12.5キロトンという値の誤差は、 $\pm 10\%$ 未満であることはほとんど疑いがないとしている。

しかし、広島原爆はプルトニウム爆弾ではなくウラン235の爆弾であったという点ばかりでなく、この爆弾は銃のように作用し、一つの重臨界物質が他の重臨界物質に対して射出されたという点においてもユニークなものであった。したがって、広島爆弾の臨界物質は、長崎の臨界物質のように連鎖反応を起こした瞬間、高爆発性最終同位元素（窒素と水素に富む）の球形殻で囲まれていなかった。さらに広島爆弾の臨界物質は6インチ（15cm）以上の鋼鉄やその他の重い物質で囲まれていた。これらの物質が中性子を相当減速させ、たいいていの核分裂装置よりもはるかに低いエネルギーの中性子から成る中性子スペクトルを産生した。

窒素は分裂中性子に対していわゆる「大断面」をもっている。すなわち、窒素核が中性子を捕捉して高エネルギーのガンマ線を放出する可能性が強い。爆発時およびその

after, but we are told that the two processes that are of paramount importance are the primary escape of fission neutrons from the critical mass and the subsequent generation of high energy gamma radiation by nitrogen capture of neutrons and the slowing down and capture of many neutrons by hydrogen, producing somewhat lower energy gamma rays.

Since the Nagasaki weapon was completely surrounded by fairly dense nitrogen and hydrogen in the high explosive end products, few of the fission neutrons actually escaped from the weapon, which instead became a source of intense gamma radiation. However, since neutrons from the Hiroshima weapon were not thus blanketed, large numbers of them were emitted to the surrounding atmosphere, where they interacted with atmospheric nitrogen to produce gamma rays. However, nitrogen in air is very much less dense than in detonation products and hence neutron flux was of importance out to considerable distances from the point of detonation. The gamma radiation produced by the Hiroshima weapon was, therefore, a mixture of gamma rays produced (as in the Nagasaki weapon) by interactions with the weapons materials themselves, and also of gamma rays produced by neutrons in a large air mass. Without going into the details of why it happens (not known, in fact, to the writer) suffice it to say that one consequence of this is that in Hiroshima gamma radiation fell off more quickly with distance from the epicenter than in Nagasaki, although this does seem surprising. Moreover, the fissioning uranium 235 of the Hiroshima critical mass produced slower neutrons than the plutonium of the Nagasaki weapon, and these, being slower, were less efficient at producing gamma rays through nitrogen capture reactions.

We may mention at this point something about the timings involved in the burst. According to Glasstone,³ the blast front (which carries about 50% of the total energy yield) is generated almost instantaneously - and has reached a distance of 560 m from the hypocenter by 1.24 seconds after detonation, 1400 m by 3 seconds. The heat output of the fireball occurs during the first 3 seconds after detonation and amounts to about 35% of the total energy. The radiation output, accounting for about 15% of total energy, is not emitted so sharply however: Although 55% of the gamma radiation output occurs within the first half-second, the remaining 45% (from fission products) is spread over the next 10 seconds or so, in a process which decays exponentially. The neutron radiation,

直後の2, 3秒間に多くの複雑な過程が起こるが、最も重要な二つの過程は、臨界物質からの分裂中性子の逸出と、窒素の中性子捕捉による高エネルギー・ガンマ線の発生とであり、さらに水素による多くの中性子の減速と捕捉が見られ、やや低エネルギーのガンマ線が放出される。

長崎の原爆は、濃度の高い窒素と水素に富む高爆発性最終同位元素で完全に囲まれていたので、実際には少量の分裂中性子が爆弾から逸出し、これがかわって強烈なガンマ線の源となった。しかし、広島爆弾では中性子はこのように囲まれていなかったため、多量の中性子は周囲の大気中に放出され、大気中の窒素と相互作用を起こしてガンマ線を産生した。しかし、空気中の窒素の密度は分裂物質中のそれよりはるかに低いので、中性子束は炸裂点からかなりの距離まで重大性をもつものであった。したがって、広島の前爆によって生じたガンマ線は、爆弾の分裂物質の相互作用によって(長崎の場合のように)産生したガンマ線と、中性子によって大気中に生じたガンマ線の混合物であった。この事象の原因の詳細(これは、筆者にもわからない)は省略するが、この事象の一つの結果として、驚くべきことには、広島の前爆線量は爆心からの距離に応じて長崎の場合よりも急速に減弱したことが挙げられる。さらに、広島の前爆物質の核分裂性ウランウム235は、長崎の爆弾のプルトニウムよりも遅い中性子を産生し、それゆえに窒素捕捉作用によるガンマ線産生に対しても効率が良くなかった。

ここで、爆発の事象と時間との関係について若干触れてみたい。Glasstone³によれば、爆風前線(総エネルギーの約50%を運ぶ)はほとんど一瞬にして産生され、爆発後1.25秒で爆心地から560 m、3秒で1400 mの距離に達した。火の球から放出された熱は爆発後の3秒間に発生し、総放出エネルギーの約35%を占める。放射線出力は総エネルギーの約15%を占めるが、しかし、さほど短時間には放出されない。ガンマ放射線の55%は最初の1/2秒以内に産生されるが、核分裂産生物の残りの45%は指数的に減少しながら次の10秒くらいにわたって放出される。

however, is all received in the first few tenths of a second.

This is mentioned because, even if one knew the orientation of a survivor at the instant of detonation, movement during the first second or two after the flash would insure that the radiation did not all impinge on the body from the same direction. The locations of burns are not necessarily a wholly reliable guide to the direction from which all radiation was received.

It is worth mentioning here that all radiation arriving at a point did not travel simply along the line of sight from the detonation. Both gamma rays and neutrons are scattered by interaction with the atmosphere, neutrons more than gamma rays. Most visible light received from the sun arrives as direct rays, but substantial amounts are scattered producing the blue sky. Gamma radiation is scattered much more than sunlight. Further, gamma rays were produced by nitrogen capture reactions in the atmosphere. The net effect was that although the intensity with which gamma radiation was received was greatest along the line of sight to the burst, very substantial amounts of scattered radiation also arrived from all directions. Tables prepared at ORNL show the directional distribution of energy received, and are used in connection with the "globe" in estimating the attenuation produced by the shielding effects of nearby structures (see below).

The second issue is the manner in which intensity of radiation decreases with increasing distance from the epicenter. The general expression which describes, at least approximately, this relationship is given by the formula:

$$D = G \times \frac{e^{-R/L}}{R^2}$$

In the above formula, D is the dose in rad. G is a constant, differing for each weapon and type of radiation, and tells roughly how much radiation was emitted. This is not strictly true, but will do for present purposes. R is the distance from the epicenter - the so-called "slant range". The squared term in the denominator is the familiar inverse square law. However, beyond the inverse square fall-off in intensity, which would apply even if the medium (like a vacuum) were completely transparent to the radiation, there is another factor to take account of the fact that actually these radiations do interact with air and consequently are attenuated. The constant L is a measure of "transparency": an

しかし、中性子放射線は、すべて爆発後最初の何分の1秒の間に受けられるのである。

炸裂の瞬間における被爆者の定位が判明していたとしても、閃光直後の1-2秒の間に動いていれば、受けた放射線がすべて同一方向からではないことになるといわれている。そこで、熱傷の部位は、必ずしも受けたすべての放射線の方向を示す完全かつ信頼性のある指針にはならない。

ある点に達した放射線のすべては、直線的に進行したのではないことをここで述べておく必要がある。ガンマ線および中性子は大気との相互作用によって散乱するが、その度合いは中性子の方がガンマ線よりも大きい。太陽から受ける多くの可視光線は直接光線として到達するが、かなりの光線は散乱して青空を作る。ガンマ線は太陽光線よりも強く散乱する。大気中の窒素捕捉作用によってガンマ線が産生された。その結果、受けたガンマ放射線の強さは爆心の方向が最も大きい、各方向から相当の量の散乱放射線も到達した。ORNLで作成された表は受けたエネルギーの方向分布を示すもので、隣接する建造物の遮蔽影響による線量減弱を推定するために"Globe"と関連させて使用されている(下記参照)。

第二の問題は、炸裂点からの距離に応じていかに放射線の強さが減少するかということである。この関係を少なくとも大まかに表わす方程式は、

である。この方程式では D はrad単位の線量で、 G は定数で爆弾の種類と放射線の種類によって異なるが、放出された放射線量を大まかに示すものである。これは厳密に言えば正しくはないが、この目的にそうものである。 R は炸裂点からの距離-いわゆる「直線距離」である。分母における2乗数は、周知の逆2乗法である。ただし、たとえ媒質(真空のような)が放射線に対して完全に透明であった場合でも適用される線量低下に関する逆2乗法以外に、もう一つの因子がある。すなわち、実際にはこれらの放射線は、空気との相互作用によって減弱することである。定数 L は「透明度」の尺度であり、 L が零の場

L of zero would characterize a completely opaque medium in which there is no transmission of radiation from the source. The value of L , called the "relaxation length", for gamma radiation in Hiroshima is given as 250 m for T65D. To see the importance of this number, consider the radiation at 2000 m (slant range) from the epicenter: Since L is 250, the ratio R/L is 8. At 8 relaxation lengths, the value of the exponential factor $e^{-R/L}$ is e^{-8} or only .000335. At 1500 m the value is .002479. So, while the inverse square law cuts the intensity of the radiation by the factor $(1500/2000)^2$ or .5625 between 1500 m and 2000 m, the exponential factor decreases in the ratio .000335/.002479 = .1351. Thus, the inverse square decrease alone would yield an intensity at 2000 m more than 50% of that at 1500 m; but the imperfect transparency of the atmosphere cuts this by a further factor of more than 7, so that in fact, the intensity at 2000 m is only 7.6% of the intensity at 1500 m $[(.1351) \times (.5625) = .0760]$.

Our purpose in belaboring this issue at such length is to stress the over-riding importance of the exponential factor, that is to say the relaxation length, in determining the rate of fall-off of radiation with increasing distance from the hypocenter. Unfortunately, the relaxation lengths applicable to the radiation from these weapons are not so easy to determine accurately. They depend, not only upon the air density and composition, but also upon the energy spectrum of each type of radiation. The gamma relaxation length in Hiroshima seems especially difficult, because gamma rays were produced by neutrons as they interacted with air, so that a calculated estimate of the effective gamma relaxation length must involve a prior estimate of the relaxation length for neutrons.

Following the work of Higashimura et al,⁴ Hashizume et al⁵ of the National Institute of Radiological Sciences (NIRS), with the collaboration of the ORNL group, have attempted to avoid these theoretical problems by making direct measurements. It turns out that some glazes, in particular those used on roof tiles in Japan, can record gamma radiation. Energy from the gamma radiation is stored in a molecular configuration, and released only when heated to a high temperature, yielding a so-called "thermoluminescence". The only problem with this method is that its use demands obtaining tiles that were unshielded and so recorded the gamma ray intensity accurately, that have not been moved since the instant of the explosion so that their location can be accurately

合は線源から放射線が伝達されない完全に不透明な媒質を表わす。広島ガンマ放射線に対する L の値、いわゆる「弛緩距離」は、T65Dの場合250 mとなっている。この数値の重要性を見るためには、炸裂点から2000 m (直線距離)における放射線を考えてみればよい: すなわち $L = 250$ であるから、 R/L の比は8である。弛緩距離が8の時、指数部分 $e^{-R/L}$ の値は e^{-8} , すなわち、わずか.000335にすぎない。一方、1500 mでは、その値は.002479である。逆2乗法は、1500と2000 mの間では $(1500/2000)^2$ すなわち.5625だけ放射線の強さを減少させるが、指数部分は比.000335/.002479 = .1351だけ減少する。したがって、逆2乗法による減少だけなら、2000 mでは1500 mにおける値の50%になるが、大気の不十分な透明度は、この値をさらに7倍も削減するので、2000 mにおける実際の強さは1500 mのその7.6%にすぎない $[(.1351) \times (.5625) = .0760]$ 。

この問題についてこのように詳細に力説した目的は、爆心地からの距離の増加に伴う放射線の低下率を算定するにあたって指数部分、すなわち弛緩距離の持つきわめて大きな重要性を強調することにある。残念ながら、これらの爆弾が産生した放射線に該当する弛緩距離は、容易には正確に決定できない。その距離は、空気の密度と構成によるばかりでなく、各種放射線のエネルギー・スペクトルにも依存する。ガンマ線は中性子が空気と相互作用を起こすときに産生されるので、有効ガンマ線の弛緩距離を推定するには、中性子の弛緩距離を先に推定する必要がある。そのため広島におけるガンマ線の弛緩距離の推定は特に困難のようである。

東村ら⁴の研究に引き続いて放射線医学総合研究所の橋詰ら⁵は、ORNLの研究班の協力を得て、直接の測定を行なってこれらの理論上の問題を回避しようと試みた。うわぐすりで特に日本瓦に使用されるものは、ガンマ線を記録しうることが明らかである。ガンマ線のエネルギーは物体の分子に貯えられ、高温に熱せられてはじめて放出されて、いわゆる「熱ルミネッセンス」を放つ。この方法における問題点は、この測定に適する瓦を求めることであつた。すなわち、瓦は、原爆時無遮蔽の状態であつて、ガンマ線の強さを正確に記録していること、原爆時の瓦の位置が全く移動させられておらず、その位置が正確に記録できること、瓦が事前に熱を受けると測定対象である貯蔵エネルギーの一部または全部が放出されるの

plotted, and that have not been affected by fires whose heat would have discharged prematurely some or all of the stored energy which must be measured. Further, since the measurement is delicate, a number of tiles must be obtained to allow for repeated measurements to obtain accuracy. Neutron flux can also be measured, the measurement again being less direct than one would like. Cobalt, which is present as an impurity in iron, is susceptible under bombardment with "slow" or "thermal" neutrons to activation, that is, transformation into the radioactive isotope ^{60}Co . One could measure the ^{60}Co activity in iron, and thus obtain a measure of thermal neutron flux. However, practically all of the neutrons emitted by the bombs were highly energetic, not thermal. It was conceived, however, that since neutrons give up energy in passing through substances like concrete, one might be able to make progress by seeking pieces of iron that were embedded in sufficient quantities of concrete; the energetic bomb neutrons would have been slowed by the concrete and then reacted with the cobalt in iron as thermal neutrons. By measuring the level of cobalt activity in such iron now, after allowing for radioactive decay over about 20 years, one could estimate the fast neutron flux ATB.

It is evident that it was no easy task that Hashizume and his colleagues set themselves. Merely to obtain samples was a difficult job. On those occasions when ferroconcrete buildings that had been present ATB were to be torn down, Dr. Hashizume, along with members of the ABCC Shielding Section, would patiently stand by, eager to obtain their documented samples at the appropriate moment. Calibration of the method required experimental bombardment of iron samples in concrete with energetic neutrons at known flux in order to learn the numerical relationship that would allow extrapolation of the results of cobalt counting back to the original neutron flux. This work was done by the ORNL group, at Dr. Hashizume's request, using the Health Physics Research Reactor as a neutron source. The air dose curves provided by ORNL as a component of the T65 dosimetry system, and those of Hashizume et al of NIRS, are shown in Figure 1.

The Effect of Shielding

Generally speaking, there are a few standard shielding configurations that survivors were in:

In the Open with no Large Structures Near Them in Any Direction. Few survivors at distances less than 1000 m were so situated; although some persons

で、火災の影響を受けていない瓦を入手すること等が必要条件である。しかも、測定は微妙であるので、計測を反復して正確を期するためには、多くの瓦を入手する必要がある。中性子線束も測定できるが、その測定もまた希望するほど直接的ではない。不純物として鉄の中に存在するコバルトは「緩徐性」または「熱性」中性子の衝突によって放射化する、すなわち放射性アイソトープ ^{60}Co に変わる性質を持つものである。鉄にある ^{60}Co の放射能を測定することによって熱中性子束を測ることができる。ただし、実際には原爆から放出された中性子はほとんどすべて高エネルギーをもち、熱中性子ではなかった。しかし、中性子はコンクリートのような物質を通過するときにはエネルギーを失うので、厚いコンクリートの中にある鉄片を求めれば測定できると考えられた。すなわち、高エネルギー中性子はコンクリートによって減速され、熱中性子として鉄中のコバルトと反応を起こしたと思われる。約20年間にわたる放射線の自然崩壊を考慮に入れた上、このような鉄におけるコバルトの放射能の値を測定すれば、原爆時の速中性子束の大きさを推定することができる。

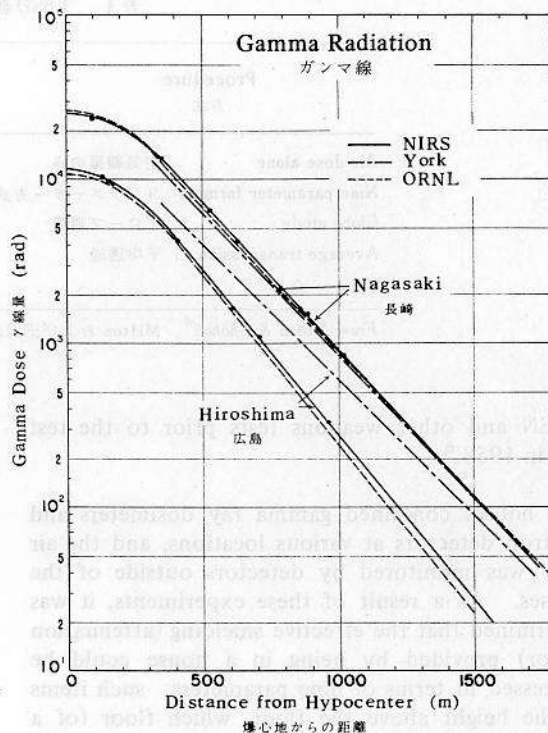
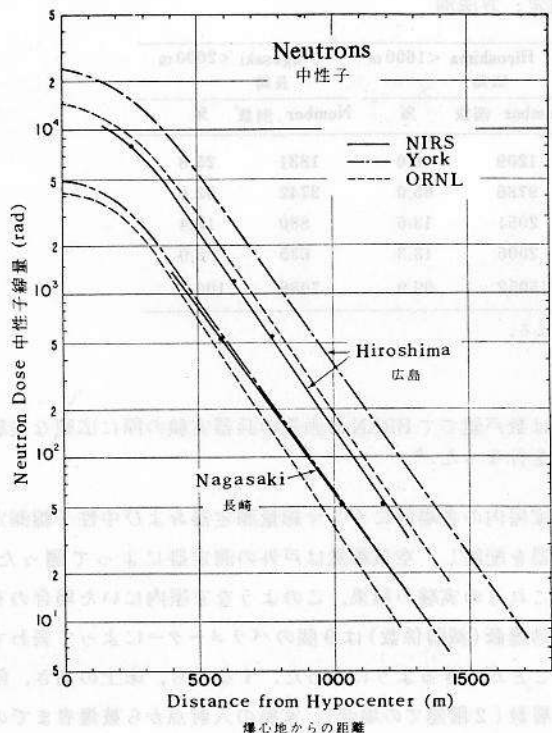
橋詰らの企画が容易な仕事でなかったことは明らかである。単に標本を入手するだけでも全く至難な仕事であった。原爆時に存在していた鉄筋コンクリート建築物が解体される時、橋詰博士はABCC遮蔽課の職員とともに解体現場で辛抱強く待機し、該当の標本を入手したものであった。方法の基準化には、既知の線束をもつ高エネルギー中性子をもってコンクリートの中にある鉄標本に実験的照射を行なう必要があった。これで得られた数的關係で、コバルト測定値を補正することによって、原爆時の中性子線束の値が得られる。この作業は、橋詰博士の要求により、ORNL 研究班が保健物理部の実験原子炉を中性子源に用いて実施したものである。ORNL が提供した T65D 線量推定方式を構成する空気線量曲線および放射線医学総合研究所 (NIRS) の橋詰らの空気線量曲線を図 1 に示した。

遮蔽効果

被爆者の遮蔽状態はおおむね次のようないくつかの標準的なものに区分することができる。

戸外で被爆者の近くのどの方向にも大きな建造物がなかった場合。この状態において1000m未満の距離で被爆し生

FIGURE 1 AIR DOSE CURVES 図1 空気線量曲線



report being in the open at close distances the stories must be considered as mistaken since the intensity of blast and heat effects at near distances were such as to make survival impossible for a person exposed in the open. Survivors who stoutly aver such experiences may be sincere in their statements; however, there is a possibility of post-concussion amnesia with a resulting erroneous story. The amnesia that sometimes accompanies shock and concussion is a well known syndrome. The fact that so few survivors do not remember the details of the event may be taken to imply that those survivors who are amnesic for the explosion have substituted for their actual experiences a satisfactory surrogate. In any case, dose estimates are easily made for survivors who were in the open, and consist merely of the estimated air doses at the assumed location of the survivors. In Hiroshima, of the 15,000 survivors within 1600 m from the hypocenter, about 1200, or 8%, have air dose estimates (Table 1).

In Houses of Common Japanese Light Wood and Tsuchikabe Construction. The majority of survivors in each city were so situated. The ORNL dosimetry group did extensive experimentation at the Nevada test site, using analogues of Japanese houses of several types singly, and in groups at Operation

存した者はわずかである。近距離の戸外で被爆したと報告した者もあるが、近距離における爆風および熱の効果の強さは、戸外で被爆した場合生存できない程度のものであったので、このような報告は誤りであると考えなければならない。そのような経験を頑強に断言する被爆者は自分の発言が正しいと考えているかもしれないが、後打撲性記憶喪失症の可能性があつて、それに伴う誤りの報告があり得ると考える。ショックと打撲に伴う記憶喪失症が起こることはよく知られた症候群である。被爆時の詳細を記憶していない被爆者は非常に少ないという事実からみて、原爆時に記憶喪失を起こした被爆者は実際の体験の代わりに適当なことがらを報告しているのかもしれない。いずれにせよ、戸外にいた被爆者の線量推定は容易に得られる。すなわち、被爆地点における推定空気線量を用いればよいのである。広島においては、爆心地から1600m未満における被爆者15,000人のうち、1200人すなわち8%の者に空気線量推定値を用いた(表1)。

木材および土壁構造の一般的日本家屋内の場合。両市における被爆生存者の大半はこの状態で被爆した。1958年核兵器実験の禁止になる前に、ORNLの線量推定班はNevadaの実験場で数種類の日本家屋の模型を単独また

TABLE 1 T65 DOSE ESTIMATES BY PROCEDURE

表1 T65D線量推定：方法別

Procedure 方法	Hiroshima <1600 m 広島		Nagasaki <2000 m 長崎	
	Number 例数	%	Number 例数	%
Air dose alone 空気線量のみ	1209	8.0	1831	25.8
Nine parameter formula 9パラメーター方式	9786	65.0	3742	52.8
Globe study グローブ調査	2051	13.6	880	12.4
Average transmission 平均透過	2006	13.3	635	9.0
Total 合計	15052	99.9	7088	100.1

From Milton & Shohji⁸ Milton および正法地⁸による。

BREN and other weapons tests prior to the test ban in 1958.⁶

The houses contained gamma ray dosimeters and neutron detectors at various locations, and the air dose was monitored by detectors outside of the houses. As a result of these experiments, it was determined that the effective shielding (attenuation factor) provided by being in a house could be expressed in terms of nine parameters: such items as the height above the floor, which floor (of a two-story house), the slant penetration distance along a ray path from the point of entrance of the house to the point in question, presence of lateral or front walls, external buildings or walls in the direction of the burst.

According to Cheka et al,⁶ under the experimental conditions in Nevada, the nine parameter formulas gave results accurate to $\pm 6\%$ in half the cases, and accurate to $\pm 17\%$ in 90% of the cases. This corresponds to a standard error of estimate of about 10%. In actual use, of course, the formula could not perform so well, since, unlike the experimental situation wherein the various parameters could be specified exactly, we must rely on the statements of the survivors for information as to height from the floor, exact position in the room (for calculation of slant penetration) and so on. The standard error of the estimated attenuations (root mean square difference between estimate and actual) therefore must exceed 10%, but there is no easy way to determine by just how much.

In Heavy, Concrete Structures. Although only a small proportion of all survivors were in heavy concrete structures, of those who were near to the hypocenters, especially in Nagasaki, a large proportion were so situated. The reason for this is that these structures provided fairly effective shielding

は数戸建てでBREN計画等の兵器実験の際に広範な実験を行なった。⁶

家屋内の各場所にガンマ線量測定器および中性子線測定器を配置し、空気線量は戸外の測定器によって測った。これらの実験の結果、このような家屋内にいた場合の有効遮蔽(減弱係数)は9個のパラメーターによって表わすことができるようになった。すなわち、床上の高さ、階層数(2階建ての場合)、家屋の入射点から被爆者までの直線透過距離、側面または前面における壁の有無、爆心の方向における建築あるいは壁の有無などの項目である。

Chekaら⁶によれば、Nevadaの実験状態では、この9パラメーター方式により、対象例の半数において誤差が $\pm 6\%$ 、対象例の90%では誤差が $\pm 17\%$ であった。これでは、推定値の標準誤差は約10%になる。しかし、実際の利用においては、各パラメーターが正確に掌握できた実験状態と違って、床上の高さ、室内にいた正確な位置(直線透過距離の算定に必要)などについては被爆者の報告を信頼しなければならないので、方程式では期待していたほどの成績が得られなかった。したがって、推定減弱値の標準誤差(推定値と実際値の差の2乗和平均の平方根)は10%を超えるに違いないが、どの程度越えているかを決定する容易な方法はない。

重コンクリート建造物内の場合。 被爆生存者のうち重コンクリート建造物内にいた者の割合は低いが、爆心地の近くにいた生存者の大部分、特に長崎の場合はこのような状態で被爆した。この理由は、このような重建造物が爆風や輻射熱に対してかなり有効な遮蔽となったからで

against blast and radiant heat and at points near to the hypocenters few persons survived who were not so protected.

Dose estimates are created, when possible, for such survivors by a "globe" operation. It is necessary to mark on a model of the building the exact point at which the person was located. The "globe" (a spherical projector devised at ORNL) is placed at this point and projects onto the surrounding walls, ceiling and window areas reticulations which when counted yield the solid angles subtended by these various structural elements. Separate counts are made within different bands of solid angle from the ray directed toward the epicenter. The counts, taken in conjunction with ORNL prepared tables which show the components of total dose that come from various directions, after allowing for attenuation by so many centimeters of concrete in the wall (and taking into account where the wall is made thicker by the presence of columns) yield finally a "globe estimate". Our purpose in detailing as much of the procedure as we have has been to lay a foundation for our conclusion that although we cannot assign a number to represent our assessment of the probable accuracy of these dose estimates, they seem unlikely to be highly accurate. They are, no doubt, better than nothing; but they may be highly inaccurate in individual instances.

In the Open, but Shielded. Some survivors were in the open, that is not within buildings, but near buildings or other structures so that some part of the incident radiation from the sky was cut off. Dose estimates for survivors in this category were also made using the globe to determine just how much of the radiation was intercepted by the shielding structures. These estimates, too, are difficult to characterize as to probable accuracy; without questioning the method, it is clear that small errors in deciding just how far a survivor was from a building could make for very large differences in the measured solid angle subtended by the building. These globe estimates, too, like those in heavy structures, discussed previously, must be considered to be affected by large errors in all likelihood, although perhaps not so large as those that pertain to heavy structures.

Miscellaneous Shielding Situations. There were survivors who were in crowded street cars; the bodies of other passengers provided some degree of shielding but it is evident that one could not hope to have enough knowledge of the geometrical configurations to be able to come to a calculated dose estimate. For some persons in miscellaneous

ある。爆心地に近い地点でこのような遮蔽を受けていなくて生存した者は少ない。

このような被爆生存者については、できる限り「グローブ」の使用によって線量推定を行なった。建物模型の中の被爆者がいた正確な点をしるす必要がある。「グローブ」(ORNLで考案された球面座標投影機)をこの被爆位置におき、周囲の壁、天井、および窓に網状の線が投影される。これを算定することによって構築物に対する立体角が得られる。爆心方向の光線によって生ずる立体角の各区分帯内において単独算定を行なう。壁のコンクリートの厚さ(cm)による減弱を考慮し、(特に柱のある部分は壁の厚さも考慮して)、各方向から入射する総合線量の要素を示すORNLの表に照らした上、算定値を用いて「グローブ推定値」が得られる。線量推定に用いられる方法をできるだけ詳細に述べた目的は、われわれはこれら線量推定値の正確性に対する評価値を設定することはできないが、おそらく推定値の正確性が低いという結論に裏付けを示すためである。推定値は明らかに、ないよりは有益であるが、個々の例においてはきわめて不正確であるかもしれない。

戸外であるが、遮蔽のあった場合。被爆生存者のうち戸外、すなわち建物の外にいたが、建物その他の構築物の近くにいたものもあり、その場合、空からの入射放射線の一部が遮断された。この群の被爆生存者についてはグローブを用いて放射線が遮蔽建造物によってどの程度遮断されたかを決定して、線量を推定した。これらの推定値がどの程度正確なものであるかを判定することは困難である。方法における問題は別として、被爆者が建物から離れていた距離におけるわずかの誤差でも、建物に対する立体角に非常に大きな差をもたらすことは明らかである。この状態におけるグローブ推定には、前述の重構造における誤差ほど大きいものはないけれども、かなり大きな誤差によって影響を受けているに違いない。

その他種々の遮蔽状態。満員電車の中で被爆した生存者もいる。ほかの乗客がある程度の遮蔽をなしたが、線量推定値を算定し得るほどの幾何学的配置を把握することはできなかった。その他の遮蔽状態にあった若干の被爆者ならびに前述の遮蔽状態に似ているが大幅に異なる状

shielding situations, as well as some others who were located in atypical variants of shielding situations discussed above, so-called "ad hoc" estimates have been made. The "ad hoc" dose estimate is provided by the exercise of judgment by a health physicist who examines the data and renders a decision. No explicit statement regarding the probable accuracy of such estimates is possible, but some fairly large errors must be expected.

DISTRIBUTION OF DOSE ESTIMATES

Model

For the purposes of this section we shall regard the air dose curves themselves as fixed, and inquire in an elementary way into the statistical properties of the dose estimates.

Let us call A the value of the air dose (gamma radiation or first collision neutron dose) at the location of the survivor ATB; we shall call T the "transmission factor" of the shielding situation and the resulting dose to the survivor D . So, by definition of T :

$$D = A \times T. \quad (1)$$

The air dose itself is in turn given by the equation

$$A = \frac{G_0}{R^2} \times \exp(-R/L) \quad (2)$$

Where G_0 is a normalizing constant, R is the slant range distance from the point of detonation (epi-center) to the survivor, and L is the so-called "relaxation length" (see above), specific for each kind of radiation (gamma rays or neutrons) and each city.

As remarked above, for present purposes we take the air dose curves as given; that is, we regard the two quantities G_0 and L as known constants, so that the air dose A is merely a function of the slant range R .

It will be convenient in what follows to deal not with the slant range, R , but instead with the ground distance to the hypocenter, which we call r :

$$R^2 = r^2 + (.5)^2, \text{ approximately, in km.}^*$$

態にいた者については、いわゆる「特別」推定が行なわれている。その「特別」線量推定は、資料を検討し決定を下す保健物理学者の判断によって行なわれる。このような推定の正確性についてはっきりしたことは言えないが、かなり大きな誤差があるに違いない。

線量推定値の分布

モデル

本節においては、空気線量曲線そのものを固定化して、線量推定値の統計学的特質を大まかに検討する。

原爆時の被爆者の位置における空気線量(ガンマ線量と一次衝突中性子線量)の値を A とし、遮蔽状態の「透過係数」を T とし、被爆者が受けた線量を D とする。したがって、 T の定義により、

空気線量そのものは、

という式で得られるが、 G_0 は標準化係数、 R は炸裂点から被爆者までの直線距離、 L はいわゆる「弛緩距離」(前項を参照)で、これは放射線の種類(ガンマ線と中性子)および都市によって異なる。

上記のように、ここでは、空気線量曲線をそのまま利用する。すなわち、 G_0 および L は既知の定数とみなすので、空気線量 A は単に直線距離 R の関数にすぎない。

次のように直線距離 R ではなくて、爆心地からの地上距離 r を用いれば好都合であろう。

$$R^2 = r^2 + (.5)^2, \text{ 近似値, km単位}^*$$

*The height of burst used in the T65 system is actually .577 in Hiroshima and .507 in Nagasaki. In Nagasaki, moreover, because of the uneven topography, the height of the burst with relation to the survivor varies somewhat. We neglect such T65D 推定方式で用いられている炸裂点の高さは、実際には広島.577、長崎.507である。その上、長崎では起伏の多い地形のため、炸裂

In these terms, the equation for A becomes:

$$A = \frac{G_0}{r^2 + .25} \exp \left(- \frac{\sqrt{r^2 + .25}}{L} \right) \quad (3)$$

The number of persons who were present and who survived at a point where the air dose was A depends upon how many people were originally at distance r from the hypocenter, modified by the fact that, for small values of r there were few survivors, but for large values, many.

Calculation of the Error Curve

We shall never know exactly the distributions within the cities of the populations at the instant of explosion. We shall, therefore, assume that the Hiroshima population was distributed uniformly, an assumption which is, perhaps, very roughly true within 2000 m from the hypocenter. In Nagasaki, because of the mountain and valley topography, a uniform distribution within a strip (the Urakami Valley) is more appropriate. Since we are interested only in qualitative kinds of results, we shall use these simple uniform distributions to gain some idea of the properties of the resulting dose estimates.

As to immediate mortality and survivorship, we rely on Oughterson and Warren⁷ Figures 3.10, 3.11 and read the total mortality at various distances from the hypocenter. Interestingly enough, the mortality data given by Oughterson and Warren for the two cities are virtually identical.

Distance from Hypocenter r , in km 爆心地からの距離	Total Mortality Proportion 総合死亡率	
	Reported 報告率	Logistic Curve $[1 + (.429) \cdot r^4]^{-1}$ 算定曲線
0.5	.92	.974
1.0	.70	.700
1.5	.37	.315
2.0	.13	.127
2.5	.04	.056

We have approximated to the Oughterson and Warren data by means of a logistic curve and correspondence between the given data and the

これで、 A の方程式は次のようになる。

空気線量が A であった地点において生存した者の数は、爆心地から距離 r にいた被爆者数によって左右される。 r の値が小さい場合は生存者が少なく、大きい場合は多かった。

誤差曲線の算定

広島・長崎両市の原爆爆発瞬間の正確な人口分布が判明することは決してあるまい。したがって、ここでは広島と長崎の人口は均一に分布していたものと仮定するが、この仮定はおそらく爆心地から2000m未達の半径においてはほぼ正しいと思われる。長崎では、山や谷のある地形のため、細長い地帯(浦上盆地)内では人口がかなり均一に分布している。われわれは質的な結果のみを求めているので、これらの単純な均一的分布を用いて線量推定値の特性の概要を得ることとする。

被爆直後の死亡率および生存率については、Oughterson および Warren⁷ の図3.10, 3.11をもとにし、爆心地からの距離における総合死亡率を示した。両市に関する Oughterson および Warren の死亡率は、事実上同じであることは興味深い。

われわれは算定曲線を用いて Oughterson および Warren が報告した率の近似値を得た。上記にみられるような報

variations and perturbations as being of little importance to the relationships we are trying to clarify, although they are, of course, quite important to the dose estimates themselves.

点の高さは被爆者の位置によって多少変化する。このような変動や動揺は、線量推定自体にとってきわめて重要であることは無論であるが、それらは、これから説明しようとしている関連事項にとってほとんど重要性のないものとして、ここでは無視している。

calculated values, as seen above, is close enough for our purposes. We use, therefore, as our curve for probability of survival as a function of ground distance, r , for both cities:

$$S = 1 - \frac{1}{1 + (.429) \times r^4}$$

For the uniform distribution assumed in Hiroshima, the population density as a function of r is proportional to r ; however, within the strip assumed for Nagasaki, the density would be nearly constant, independently of r , at least at distances greater than the width of the strip. The density of survivors, therefore, would be, in Hiroshima,

$$S_H = K_H \times r \times \left[1 - \frac{1}{1 + (.429) r^4} \right] \quad (4a)$$

and in Nagasaki, approximately

$$S_N = K_N \times \left[1 - \frac{1}{1 + (.429) r^4} \right] \quad (4b)$$

where K_H , K_N are normalizing constants.

Up to this point we have expressed results in terms of r , the distance from the hypocenter. This, be it noted, is the "true" value of the distance, and is unknown. In practice we deal with another value which we call x , the distance from the hypocenter determined from the shielding history taken some years later. Hopefully x is a good approximation to r , but there are certainly errors. We assume that we can express x as:

$$x = r + y$$

where y , the "error", is normally distributed with mean zero and unknown variance σ^2 . That is, we assume that for an individual x is an unbiased estimate of r . In fact, this is probably not true, since the provisions of the Atomic Bomb Survivors Medical Treatment Law give survivors an economic motivation to claim exposure near to the hypocenter. There are, in our files case histories of survivors who have "migrated" towards the hypocenter as evidenced by comparison of exposure histories taken at intervals of several years. Such a bias would have the effect of increasing the estimated doses. We have no measurements of the possible magnitude of this bias, but it may be large. For

告資料と算定値との一致性はここでの目的に対しては十分である。したがって、生存の確率曲線を次の方程式を用いて両市における地上距離 r の関数として求める。

広島で仮定された一様分布については、 r の関数としての人口密度は r に比例する。しかし長崎における細長い地帯内では、少なくともその地帯の幅より遠い距離においては、密度は r と関係なく、ほとんど一定であろう。したがって、広島における生存者の密度は、

となり、長崎ではおよそ次のようになる。

ただし、 K_H , K_N は標準化定数である。

ここまでわれわれは、爆心地からの距離 r を用いて結果を表わしてきた。これは距離の「真の」値であり、しかもそれは不明なものであることに注目する必要がある。実際には、われわれは x と称するもう一つの値、すなわち、原爆後何年かたって行なった遮蔽調査で得られた爆心地からの距離を扱う。 x は r のよい近似値であることを期待するが、誤差のあることは確かである。 x は次の式のように表わすことができると仮定する。

ただし、「誤差」 y は、平均 0 および未知の分散 σ^2 をもつ正規分布をなす。すなわち、各個人に対しては x は r の不偏推定量であると仮定する。実際には、原爆医療法の給付規定が、被爆者が被爆位置として爆心地に近い距離を報告する経済的動機になるので、このことはおそらく正しくないであろう。当所の保存記録によれば、数年の期間をおいた被爆調査の比較により、明らかに被爆地点が爆心地に向かって「移動」した例もある。このような偏りは、推定線量を増加させる影響をもつものである。この偏りの大きさは測定していないが、大きなものであるかもしれない。たとえば、爆心地からの距離がわずか

example, a decrease of only 50 m in distance from the hypocenter increases the total air dose by about 34% in Hiroshima, and by about 22% in Nagasaki (Ref. 8, Tables 3, 4). We can for the present say no more than that, all other influences on the dose estimates apart, they are subject to a probable upward bias of unknown magnitude which arises from the tendency of some survivors to claim exposure at points nearer to the hypocenters than was actually true.

Returning to our argument, the random, normally distributed component of the distance error, y , can be written as

$$y = x - r$$

and the density, apart from constants, for fixed r is:

$$\exp \left[-1/2 \left(\frac{x - r}{\sigma} \right)^2 \right]$$

Multiplying this by the densities of the distances r themselves (4a & 4b above) we obtain the joint densities of r and x :

$$G_H = S_H \cdot \exp \left[- \frac{(x - r)^2}{\sigma^2} \right] \quad (5a)$$

$$G_N = S_N \cdot \exp \left[- \frac{(x - r)^2}{\sigma^2} \right] \quad (5b)$$

Equation (3) expresses the *true* air dose, A as a function of r , the true ground distance. Call the *estimated* air dose Z . We have, corresponding to (3)

$$Z = \frac{G_0}{x^2 + .25} \exp \left[\frac{-\sqrt{x^2 + .25}}{L} \right] \quad (6)$$

Our objective is to decide, for a given *estimated* air dose of Z rad, what is the probable distribution of the *true* air doses, and what is their mean value? Using equations (3), (5a) or (5b), and (6), with the assistance of a computer, we have achieved our goal: We fix x , obtain the estimated air dose Z from (6), then from (5a) or (5b) obtain the densities for a sequence of values of r covering the appropriate range conditional on that fixed x and effect the transformation from each r to A through equation (3). Table 2 shows the results, as the mean values of A , for various values of Z for a number of different assumed values for the standard deviation σ which figures in equation (5). The dimension of σ is, of

50m減少すれば、総空気線量は広島では約34%、長崎では約22%増加することになる(参考文献8,表3,表4).線量推定に及ぼすその他の影響は別として、被爆者には被爆地点を実際よりも爆心地に近く主張する傾向があることから見れば、推定線量値を増大させる、大きさの不明な偏りがあるという以外のことは言えない.

論点にもどって、距離誤差 y は正規分布をなす確率変数で次のように表わされる:

また、定数を考えないと、固定した r に対して、その確率密度は、次のように表わされる:

これに距離 r 自体の関数(上の4a & 4b)としての被爆者の密度を掛ければ、 r および x の同時密度が得られる:

方程式(3)は、真の空気線量 A を、真の地上距離 r の関数として表わしている。推定空気線量を Z とすれば、(3)に対応しては次の式が得られる。

われわれの目的は、推定空気線量 Z rad に対して、真の空気線量の分布とその平均値を決定することにある。われわれは計算機を使用して、方程式(3)、(5a)または(5b)および(6)を用いて、目的を達成した。すなわち、 x を固定し、(6)から推定空気線量 Z を得て、方程式(5a)または(5b)からその x を固定した上で、妥当な範囲を含む一連の r に対する密度を得、そして、方程式(3)を用いて各 r から A への変換を行なう。表2には、結果を A の平均値として、種々の Z の値に対して、また方程式(5)に示される標準偏差 σ に対するいろいろの異なる仮定

TABLE 2 MEAN TRUE DOSE AS A FUNCTION OF ESTIMATED RAD DOSE
IN TERMS OF THE ERROR PARAMETER

表2 推定線量の関数としての平均実際線量：誤差パラメーター別

Error Parameter 誤差パラメーター	Hiroshima — Estimated Dose 広島 の推定線量							
	37	62	103	172	288	481	802	1328
60 m	38	62	103	170	281	464	760	1234
80	38	63	103	169	277	451	730	1169
100	39	63	103	167	270	435	695	1094
120	39	63	102	165	263	418	656	1014
140	40	64	102	162	255	399	615	933
160	40	64	101	159	247	379	573	854
	Nagasaki — Estimated Dose 長崎 の推定線量							
	143	212	314	466	694	1036	1547	2301
60 m	145	214	315	465	687	1015	1497	2198
80	147	215	315	463	681	999	1461	2124
100	148	216	316	461	673	979	1418	2037
120	150	218	317	459	664	956	1368	1940
140	152	220	317	456	653	930	1314	1838
160	155	222	318	452	641	902	1257	1734

course, meters. Selected data from Table 2 are shown graphically in Figure 2.

Analytic Approximation of the Error Curve

The mean error curves tabulated in Table 2 were calculated by computer from the model given above. For some purposes, however, it would be very useful to be able to approximate these curves by a simple analytic formula.

Recalling our convention of using A for actual air dose to the survivor and Z for the estimated dose, then what we want is an analytic formula that will show the average value of A for each value of Z .

If the values shown in Table 2 are plotted on double logarithmic paper it turns out that the relationship between A and Z is very nearly a straight line; that is, we can represent A approximately by

$$\log A = a + b \log Z$$

and the parameters will be more meaningful if we write the equation as

$$\log A = \alpha \log P + (1 - \alpha) \log Z$$

so that

$$A = P^\alpha \times Z^{1-\alpha}, \text{ or } A = Z \times (P/Z)^\alpha$$

値に対して示してある。σの単位はもちろんメートルである。表2から選定した資料は図2に示した。

誤差曲線の解析的近似

表2に示した平均誤差曲線は、上記のモデルに基づき、コンピューターによって算出されたものである。しかし、ある目的のためには、単純な解析方程式によってこれらの曲線の近似値を求めることができれば非常に有用なことである。

前述と同様に被爆者が受けた実際の線量を A とし、また推定線量を Z とする。われわれが求めようとしているのは、各 Z 値に対する平均値 A を示す解析方程式である。

表2にある数値を二重対数用紙に示した場合、 A と Z との関係はほとんど直線に近いことがわかる。すなわち、 A を次のように大まかに表わすことができる。

方程式を次のように表わせば、パラメーターはより有意義なものとなる。

すると、

すなわち

In this last form we can see easily that P is the pivotal value such that if $Z = P$ then $A = Z$, while, with positive α , when $Z < P$ then $A > Z$ and when $Z > P$ then $A < Z$.

We have approximated some of the curves represented in Table 2 by a least squares fit to the logarithms of the values. The quality of the fit can be judged from the data shown below:

Estimated Dose (rad) 推定線量	Hiroshima 広島 Error Parameter 誤差パラメーター				Estimated Dose (rad) 推定線量	Nagasaki 長崎 Error Parameter 誤差パラメーター			
	60		160			60		160	
	Table 2 表2の公式	Formula 表2の公式	Table 2 表2の公式	Formula 表2の公式		Table 2 表2の公式	Formula 表2の公式	Table 2 表2の公式	Formula 表2の公式
37	38	38	40	41	143	145	146	155	159
62	62	63	64	64	212	214	214	222	224
103	103	103	101	99	314	315	315	318	315
172	170	169	159	154	466	465	463	452	444
288	281	279	247	240	694	687	684	641	628
481	464	461	379	371	1036	1015	1012	902	890
802	760	758	573	575	1547	1497	1498	1257	1262
1328	1234	1238	854	885	2301	2198	2198	1734	1782

As can be seen, the values approximated by the formula are reasonably close to the Table 2 numbers that were generated by the computer. The parameter values obtained were:

	Hiroshima 広島		Nagasaki 長崎	
	P	α	P	α
$\sigma = 60$	90	.0260	347	.0213
$\sigma = 160$	81	.1450	320	.1295

It is of interest that, in each city, the value of the "pivotal" value P is little affected by the size of the error parameter, and we can, therefore, in a general way conclude that in Hiroshima, estimated doses less than about 80 rad are *underestimated*, and larger estimated doses are *overestimated*; while in Nagasaki, only doses exceeding 320 rad are, on the average, overestimated, smaller values being underestimated.

Thus far we have been discussing A and Z , the true and estimated air doses. Recalling our notation, and introducing two new symbols, let

- A = Air dose, true
- Z = Air dose, estimated
- T = Transmission factor, true
- S = Transmission factor, estimated

この最後の式では、 P が次の意味で枢軸的な値であることが容易にわかる。すなわち、 $Z = P$ のとき、 $A = Z$ となり、 α が正の場合は、 $Z < P$ のとき $A > Z$ となり、 $Z > P$ のとき $A < Z$ となる。

表2に示した曲線のいくつかを、各値の対数に最小2乗法を適用することによって近似させた。その適合性は、下記の資料によって判定できる。

表に示すとおり、公式により近似させた値は、計算機で算出された表2の数値にかなり近い。得られたパラメーターの値は、

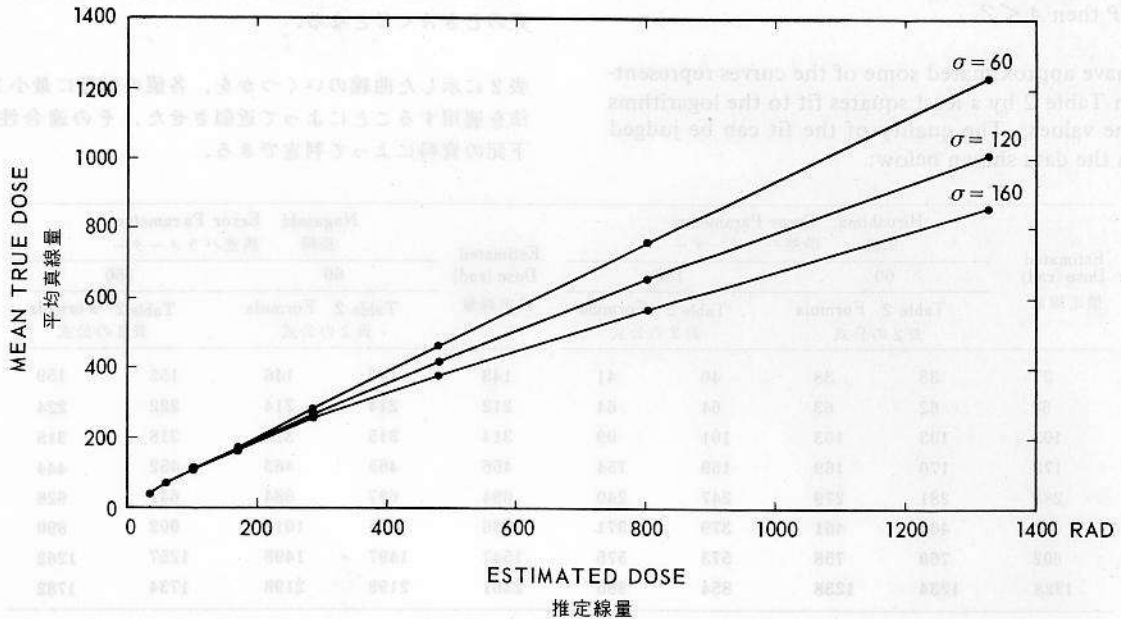
両市とも、「枢軸」値 P は誤差パラメーターの大きさにほとんど影響されないことは興味ある結果であって、おおむね広島では80 rad未満の推定線量は過小評価され、80 rad以上の推定線量は過大に評価されるが、一方長崎では、320 radを越える線量のみが概して過大評価され、これより低い値が過小評価されている。

今まで真の空気線量 A と推定空気線量 Z について論及してきた。前記の記号とともに二つの新しい記号を導入し、

- A = 真の空気線量
- Z = 推定空気線量
- T = 真の透過係数
- S = 推定透過係数

FIGURE 2 MEAN TRUE DOSE AS A FUNCTION OF ESTIMATED DOSE (HIROSHIMA, TOTAL DOSE)

図2 推定線量の関数としての平均真線量(広島, 総線量)



$D = T \times A$, Dose to survivor, true
 $W = S \times Z$, Dose to survivor, estimated.

$D = T \times A$, 被爆者が受けた真の線量
 $W = S \times Z$, 被爆者が受けた推定線量

The error curve connecting Z and A was

とする。 Z と A を関連づける誤差曲線は、

$$A = Z \times (P/Z)^\alpha$$

Replacing A by its value D/T and similarly Z by W/S , we are led to

であったが、 A をその値 D/T で置き換え、同様に Z を W/S で置き換えた場合、

$$D = W \times (T/S) \times (PT/W)^\alpha$$

as the equation expressing the mean true dose to the survivor as a function of the estimated dose W . It will be noticed that the exponent α is unaltered, but that the effective pivotal value is now multiplied by T , that is, usually becomes smaller. The entire expression is multiplied by T/S .

となる。すなわち、被爆者が受けた真の平均線量値を推定線量 W の関数として表わす方程式が得られる。注目すべきことは、この方程式で指数 α は不変であるが、重要な枢軸値には T が乗せられる。すなわち、一般にその値は小さくなるということである。表現全体には T/S が乗せられる。

Implication of the Error Curve for Dose Response Relations

線量反応関係に対する誤差曲線の意義

The reader has no doubt already anticipated the next conclusion: That the dose response relationship for any effect, when measured against the *estimated* doses, will not be exactly linear even when the true dose response curve is actually a straight line.

読者はすでに次の結論を予想していたであろう。すなわち、どんな影響について見た場合にも、線量反応関係を推定線量と対比した場合、それは真の線量反応曲線が実際には線形である場合でさえ正確には線形にはなるまいということ。

Specifically, suppose that for some disease like leukemia or cancer it is a fact that, for a given city and age group and time period

$$I = a + b \times D$$

that is, incidence of disease is a linear function of dose to the survivor. The general relationship found above

$$D = W \times (T/S) \times (PT/W)^\alpha$$

leads immediately to

$$I = a + b \times W \times (T/S) \times (PT/W)^\alpha$$

as the functional relationship that will exist between incidence and the *estimated* doses. If α is near zero the variation from a linear relationship will not be great; but if α is as much as .13 ($\sigma = 160$) an appreciable measure of convexity will be imposed upon the dose response curve.

Implications for Estimation of RBE

An important task, to which we have only recently been able to give serious attention, is that of estimating the Relative Biological Effectiveness (RBE) of neutrons as compared with gamma radiation.^{9,10} Such efforts will no doubt continue. However, those who work in this area with ABCC material should be aware of the problems: Not only does RBE apparently vary with different end-points, but it is thought to be a function of dose level also.¹⁰ To these complications we can now add a third: Our error curves were calculated for the total dose. Such curves could, however, be calculated separately for neutrons and for gamma radiation. Because of differing relaxation lengths for these two kinds of radiation the error curves will be different and, in fact, both are unknown. It would be rash to assert that human ingenuity is incapable of resolving all of these difficulties and achieving a solid answer to the problem; but we are not sanguine.

THE VALUE OF THE ERROR PARAMETER

General

In Table 2 we have tabulated the bias in the estimated doses resulting from our model in terms of an unknown error parameter σ . Our immediate task is to gain some idea, unfortunately necessarily vague, as to how large σ might be.

白血病や癌のような疾病では、与えられた都市、年齢群および期間に対して、次のようになると仮定する。

すなわち、疾病の発生率が被爆者が受けた線量の線形関数であると仮定する。上記で認められた一般的な関係、

からただちに次の式が導かれる。

上の式は発生率と推定線量との間に存在する関数関係を表わすものである。もし α が0に近い場合は、線形関数からの変動は大きくないが、 α が.13 ($\sigma = 160$)ほどであれば、線量反応曲線はある程度凸状になる。

RBEの推定における意義

われわれがごく最近、真剣に注目してきた重要な仕事は、中性子のガンマ線に対する相対的生物学的効果(RBE)の推定である。^{9,10} そのような努力は今後とも続行するであろう。ABCCの資料を用いてこの分野に携わる者は次の問題を認識しておく必要がある。すなわち、RBEは影響の種類によって異なるばかりでなく、線量水準の関数であるとも考えられる、¹⁰ ということである。この複雑な点にもう一つ問題になる要因を追加することができるとは、われわれの誤差曲線は総線量について計算したものである。しかし、このような曲線は、中性子およびガンマ線についてそれぞれ独立して算定することができた。これら2種類の放射線についての弛緩距離は異なっているので、その誤差曲線にも差があるが、実際には両者とも明らかでない。人間の工夫力ではこれらすべての困難の解決も、この問題に対する確答も得られないと断言するのは早計であろう。しかし、われわれは楽観的ではない。

誤差パラメーターの値

総論

表2では、推定線量値に対してわれわれのモデルによる偏りを、未知の誤差パラメーター σ によって集計している。われわれの当面の任務は、残念ながら漠然としたものとなるのはやむを得ないが、いかに σ が大ききものであるかについて何らかの概念を得ることにある。

It will be recalled that the error parameter, σ , is a measure of error in evaluation of the survivor's distance from the hypocenter. Other errors concern evaluation of the transmission factor. However, since

前述のように誤差パラメーター σ は被爆者の爆心地からの距離を評価する上の誤差尺度である。その他の誤差は、透過係数の評価に関するものである。しかし、

$$D = T \times A, \text{ or } \text{すなわち}$$

$$\log D = \log T + \log A, \text{ and similarly } \text{同様に}$$

$$\log W = \log S + \log Z$$

and we can write

であるから、次のように書くことができる。

$$\log D = \log W + \delta, \text{ and } \text{および}$$

$$\log T = \log S + \delta_1$$

$$\log A = \log Z + \delta_2, \text{ so that } \text{したがって}$$

$$\log W + \delta = \log S + \delta_1 + \log Z + \delta_2, \text{ or } \text{すなわち}$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2.$$

That is, the error in estimating $\log D$ is merely the sum of the errors in estimating $\log T$ and $\log A$. Since, effectively, $\log A$ is a linear function of distance from the hypocenter, δ_2 is measured in distance, and if δ_1 is measured in comparable units, we can then absorb both δ_1 and δ_2 into δ , measured in meters. This is the program we shall follow, since it enables us to put all contributions to variation in dose estimates into a single number.

すなわち、 $\log D$ の推定誤差は、単に $\log T$ と $\log A$ の推定誤差の合計にすぎない。事実上、 $\log A$ は爆心地からの距離の線形関数であるから、 δ_2 は距離で測定され、もし δ_1 が同じ単位で測定されるならば、 δ_1 と δ_2 の双方をメートルで現わした δ に統合することができる。これがこれらわれわれが見ていこうとする計画で、これにより線量推定における変動に対するあらゆる寄与を単一数字で表現することを可能にしてくれるのである。

Contribution from the 9-parameter Formula

9-パラメーター方式からの寄与

We have already mentioned that it is possible to calculate from the material presented by Cheka et al⁶ that the standard error of estimate of the 9-parameter formula, under experimental conditions at the Nevada test site, was about 10%. Since σ is meters, we need to express 10% in meters; fortunately this can be done, since the logarithm of dose is very nearly a linear function of distance from the hypocenter, at least at distances which are of interest to us.

前述のように、Chekaら⁶が提示した資料に基づいて行なった計算によれば、Nevada実験場における実験条件のもとでは、9-パラメーター方式の推定値の標準誤差は約10%である。 σ はメートル単位であるから、10%はメートルで表わす必要がある。線量の対数は、少なくともわれわれに関心のある距離では、ほとんど爆心地からの距離の線形的関数であるから、この10%をメートルで現わすことができる。

If the relation between exact and 9-parameter estimated dose is

もし正確な線量と9-パラメーターによる推定線量との関係が、

$$\text{Dose}_{\text{EXACT}} = D_E = \text{Dose}_{9\text{-PAR}} \times (1 \pm 0.1)$$

then

であれば、

$$\text{Log } D_E = \text{log } D_9 + \text{log } (1 \pm 0.1),$$

and this latter range is log 0.9 to log 1.1, or -.0458 to +.0414. This range corresponds to two standard deviations, so, in logarithmic terms,

$$\sigma = .0436.$$

Consulting Milton and Shohoji's Tables 3 and 4,⁸ we find that the slope of log total dose, as a function of distance, is, for Hiroshima, .00230/meter, and for Nagasaki .00177/meter, so that, finally, our result is, in meters:

Hiroshima 広島 : 19 m, Nagasaki 長崎 : 25 m

It is worth saying again what these deviously calculated numbers purport to be: They are the equivalents, expressed in units of distance from the hypocenter in meters, of the standard error of the 9-parameter formula as determined under experimental conditions. We shall obtain some other components to add to this, so will designate these as σ_1

$$\sigma_1 (H) = 19 \text{ m}, \quad \sigma_1 (N) = 25 \text{ m}.$$

Contribution from Errors in Evaluation of Elements of the 9-parameter Formula from Shielding Histories

Milton and Shohoji⁸ show in an Appendix the so-called 9-parameter formulas, copied from Cheka et al.⁵ A number of factors which enter are of such nature that, with high probability, they are exactly correct, and we shall simply assume them to be so. These are:

FN: Floor number
IFW: Number of internal front walls
ILW: Number of internal lateral walls
FS: Presence of a shielding structure in front
FSS: Size of FS, if present
LS: Presence of a lateral shielding structure.

Putting aside the six parameters listed above, we are left with three for which the quality of the information about individuals must be regarded as more ambiguous:

SP: Slant penetration, in feet
US: Distance from any unshielded window in the direction of the epicenter, in 5-foot zones
HF: Height above floor, in yards.

となり、この後者の範囲は log 0.9 から log 1.1, すなわち、-.0458 から +.0414 までである。この範囲は標準偏差 2 に相当するので、対数で表わせば、次のようになる。

Milton および正法地の表 3 および 4⁸ を参考にすると、距離の関数としての総線量の対数の傾斜は、広島では .00230/m, 長崎では .00177/m であるので、結局われわれの結果はメートルで表わせば、次のようになる。

繰り返し述べるが、これらの速回りに算定した数値は、実験の条件のもとで測定された 9-パラメーター方式の標準誤差について、爆心地からの距離の単位 (m) で示されたものであることを意味する。われわれは、その他の要素をいくつか入手してこれに追加するので、これらを σ_1 と呼ぶことにする。

遮蔽記録による 9-パラメーターの方式の要素の評価における誤差による寄与

Milton および正法地⁸ は、その付録において、Cheka ら⁵ が発表したいわゆる 9-パラメーター方式を掲示している。この公式に含まれるいくつかの因子はその内容からして正確であるという確率が高く、われわれも正確であるとみなす。すなわち、

FN: 階層数
IFW: 内部前壁数
ILW: 内部側壁数
FS: 前方遮蔽建築物の有無
FSS: 前方遮蔽建築物の大きさ
LS: 側方遮蔽建築物の有無

上記六つのパラメーターのほか、次の三つがあるが、資料の質がよりあいまいなものとみなさなければならぬ。

SP: 直線透過距離 (フィート単位)
US: 爆心方向にある遮蔽されていない窓からの距離 (5 フィート区分)
HF: 床上の高さ (ヤード単位)

The third of these, HF, actually figures in neutron calculations only; in the numerically more important gamma dose estimation, although the parameter enters into the formula, it is arbitrarily assigned the constant value 0.9, so that really the parameter is not present, only its ghost. However, SP and US present more substantial problems.

In point of fact, however, US practically takes only two values: About 25% of the cases are coded zero, meaning the survivor was within 5 feet of a window, and about 75% are coded that there was no unshielded window in the direction of the epicenter; in only 45 cases, out of more than 18,000 shielding histories, was the coding for a situation in which there was a window, but the survivor was located more than 5 feet from it. This seems strange. However, how much difference does it actually make? The following table shows additional percent of air dose (gamma) received from window by distance from window:

Distance from Window 窓からの距離	Total 総数	Hiroshima 広島	Nagasaki 長崎
No window 窓のない場合	14101	-	-
5 feet, but less than 10 feet 5-10フィート	43	5.3%	0.6%
Less than 5 feet 5フィート未満	4272	49.2%	60.2%

As shown it makes a great deal of difference: In Hiroshima, if one is directly behind and close to a window unshielded in the direction of the epicenter, one is estimated to get an additional 50% of the gamma air dose at that distance, but if one is more than 5 feet from the window only 5%; there are no categories in between and in Nagasaki the situation is even more extreme.

We have no idea what was in fact the proper distribution of distances from unshielded windows of the 25% of survivors so situated. We hazard the guess that the standard error of the dose estimate must have been at least 15% for these persons; so therefore take 4% (one quarter of 15%) as the contribution to overall variability arising from variation in the determination of US.

As to SP, the Slant Penetration, although at first inspection the terms in the equations appear to place considerable importance on this factor, in fact there are restrictions placed on its use, depending upon whether there is or is not front shielding (FS) by another building or wall, and it appears, as nearly as we can tell, that probably this parameter is

このうち、3番目のHFは実際には中性子の計算のみに用いられる。数的により重要なガンマ線量の推定においては、このパラメーターは公式に含められるけれども、それは任意に定められた定数0.9であるので、実際にはそのパラメーターは存在せず、その幻影のみが存在する。しかし、SPおよびUSはより根本的な問題を提起する。

しかし、事実上USはほとんど二つの値のみをとる：対象例の約25%は0と符号化されているが、これは被爆者が窓から5フィート(約1.5m)以内に位置していたことを意味し、また約75%は爆心の方向に遮蔽されていない窓のなかったことが符号化されている；窓はあったが、被爆生存者が窓から5フィート以上の位置にいたという状態が符号化されているのは、遮蔽調査記録18,000例以上のうちわずかに45例であった。これは不思議なことに思われるが、それによってどれほどの差ができるであろうか。次の表は、窓から受けた空気線量(γ線)の追加率を窓からの距離別にみたものである。

上の表に示すとおり、大きい差が生ずる：広島では、対象者が爆心地の方向に遮蔽されていない窓のすぐ内側に近接している場合は、その位置で50%の余分のガンマ空気線量を受けていると推定されるが、窓から5フィート以上離れた位置にいれば、5%にすぎない。中間では区分がなく、長崎ではその状態はいっそう極端でさえある。

そのような状態にあった被爆生存者の25%の遮蔽されていない窓からの距離の分布が実際にはどうであったかは見当がつかない。あえていえば、線量推定値の標準誤差は、これらの者では少なくとも15%であったに違いない。したがって、US測定における変動から生ずる全体の変動への寄与を4%(15%の $\frac{1}{4}$)とする。

公式におけるSP(直線透過距離)は、表面的にはかなり重要性があるようではあるが、実際には、他の建物または壁による前方遮蔽の有無に応じてその利用には制限があり、われわれのいえる限りでは、おそらくこのパラメーターは大して重要なものではあるまいと思われる。したがって、われわれは、パラメーター自体の推定値におけ

not of major importance. We thus remain with the estimate of about 4%, derived from the consideration of US, as the component of error resulting from errors in estimation of the parameters themselves. Calling this contribution σ_2 , by a similar line of argument to that employed in obtaining σ_1 , we transform to meters in both cities obtaining:

$$\sigma_2(H) = 8 \text{ m}, \quad \sigma_2(N) = 10 \text{ m}.$$

Contribution from Errors in Determination of Location of Individual Survivors

We are dependent upon statements made by the survivors (or sometimes other persons such as a relative or other person in the same place) as to where they were located ATB. Information so supplied may be erroneous for at least two possible reasons:

Simple Error — The survivor may, simply, be mistaken in his statement. Reasons may include postconcussion amnesia or other reasons.

Deliberate Misstatement — Because of provisions of welfare laws that benefit survivors, especially those exposed near to the hypocenters, or alternatively because of worry about what others may think, some survivors may consciously claim exposure either nearer to or farther from the hypocenter than was actually the case.

We are in possession of little direct evidence that bears on this subject, but a limited amount of indirect evidence is available, arising principally from a set of 88 double interviews made on Nagasaki survivors at an interval of several years.⁷

We need a little mathematical apparatus to use the data. We suppose that the "true" distance for a survivor was x , and that y_1 and y_2 are two statements made by him as to his distance, at two different times. Suppose further that

$$y_1 = x + b_1 + \epsilon_1$$

$$y_2 = x + b_2 + \epsilon_2$$

where b_1 and b_2 are "biases" at the two times, while the two epsilons are simple error components, which we assume to be independently distributed with zero means and common variance σ^2 .

The model outlined above is evidently less than wholly realistic but, even so, it provides for more

る誤差から生ずる誤差の構成要素として、US の考察による約 4% の推定値をいぜんとして用いる。 σ_1 を得るために用いられたものと同様の論法によって、この寄与を σ_2 と呼称し、両市で得た値をメートルに換算すれば、次のようになる。

各被爆者の位置を決定する際の誤差から得られた寄与。

被爆者が原爆時にどこにいたかについては、被爆者自身の報告に頼っているが、時には親族あるいは同一場所にいた者のような、本人以外の者の発言に頼ることもある。このようにして提供された情報は、少なくとも次の二つの理由で誤っているかもしれないと考えられる。

単純な誤差: 被爆者は単純に誤って報告しているかもしれない。理由としては、衝撃後の健忘症その他の理由があげられる。

故意の誤報: 福祉関係の法律では、被爆者、特に爆心地近くで被爆した者は特典を受けるが、反面、他人がどう思うだろうかと憂慮する者もあって、被爆生存者の中には意識的に実際よりも爆心地に近く申告したり、遠く申告したりする者もある。

われわれには、この問題に関する直接の証拠はほとんどないが、主として、長崎の被爆者に関して数年の期間で行なわれた 88 件の二重面接により、限られた量の間接的証拠が入手されている。⁷

資料を利用するには数学的手段が少し必要である。被爆者についての「真の」距離が x であり、 y_1 および y_2 はその被爆者がそれぞれ別な時に報告した距離であると仮定する。さらに、

であると仮定する。ただし、 b_1 および b_2 はその 2 回における「偏り」であり、また二つの ϵ はそれぞれ独立に平均値 0、共通分散 σ^2 をもつ分布を仮定した単純な誤差である。

上に要約したモデルは、完全に現実的とまでいえないことは明らかであるが、たとえそうであっても、われわれ

than our data can handle. We feel, nevertheless, that it is better to have even poor approximations to truth than to be totally ignorant.

We can eliminate the (unknown) value x by subtracting:

$$z = y_1 - y_2 = (b_1 - b_2) + (\epsilon_1 - \epsilon_2).$$

Taking expected values, we get

$$E(z) = b_1 - b_2$$

and squaring, and taking expected values we get

$$E(z^2) = (b_1 - b_2)^2 + 2\sigma^2.$$

The relevant Nagasaki data (88 double interviews), in the units originally employed⁷ are shown below:

Difference in T57 Dose Estimates (L -units)	Number
T57D 線量推定値 (L -単位) における差	例数
6	1
5	1
4	1
3	-
2	2
1	9
0	57
-1	12
-2	3
-3	2

In the table above, the L -unit, in which z is measured, being a log dose unit has the dimension of distance from the hypocenter, and the relationships are such that 1 L -unit is equivalent to

43 m (Hiroshima 広島), 57 m (Nagasaki 長崎).

From the table we calculate the average value of z and of z^2 , and equate them to their values in terms of the parameters b and σ , getting

$$b_1 - b_2 = .0455$$

$$\sigma^2 = .7715$$

whence $\sigma = .88$ L -units, or

$$\sigma_3 (H) = 38 \text{ m}$$

の資料で処理できる以上のものを与えてくれる。われわれは、不十分なものであっても真実への近似値を得るほうが、全然無知であるよりは有益であると思う。

(未知の)値 x は、差し引くことによって除くことができる:

期待値をとれば、次のようになる。

また2乗し、期待値をとれば、次のようになる。

長崎の関係資料(二重面接88例)を、そこで用いられている単位⁷で示せば、次のとおりである:

上記の表では、 z も測定されている L 単位は対数線量単位であり、爆心地からの距離の次元を示す。そのような関係であるので、1 L 単位は次に相当する:

この表から z および z^2 の平均値を算定することができ、それらを、パラメーター b および σ で表わした値に等しいとすることにより次の値を得る。

よって $\sigma = .88$ L 単位, すなわち

$$\sigma_3 (N) = 50 \text{ m}$$

where σ_3 represents the component of error in the air-dose estimates due to random, unbiased error in statements as to location ATB.

The difference in biases, only .05 L-units, corresponds to only about 1 m in each city and can be ignored. Unfortunately, this is only the *difference* in bias at two times, and does not assure us that the bias at each time was necessarily small. We nevertheless neglect bias, for lack of information, and note that our final estimate of error is more likely to be too low than too high.

Contribution from Imprecision in Location of the Hypocenter

A variation of only 25 m in distance from the hypocenter corresponds to a 12.5% variation in total air dose in Hiroshima, 10% in Nagasaki. Even if the location of a survivor is known exactly, if the presumed location of the hypocenter were wrong by 25 m some survivors would receive dose estimates 10%-12% too high, some too low by the same amount and others would change by lesser amounts depending upon angular relationships. If the location of the hypocenter has an imprecision measured by a variance V , then the resulting variance of the distances from the hypocenter of the survivors will be approximately $V/2$ in consequence of the imprecision (see Appendix for the justification).

We shall follow the data and analysis provided by Hubbell et al.¹¹ These authors state that the height of burst in Hiroshima is estimated at 580 ± 15 m, and in Nagasaki at 504 ± 10 m. At 1200 m, in Hiroshima, an increase of 15 m in height of burst increases slant range by only 6 m, and in Nagasaki an increase of 10 m in height of burst increases slant range by only 3 m. Since an increase (decrease) in height of burst would decrease (increase) the slant range for *all* survivors in that city (not equally, it is true), only minimal variations in relative dose to different survivors could result from error in the height of burst, and we shall ignore this problem as unimportant for present purposes.

Hubbell et al.¹¹ however do give standard errors for the coordinates of the estimated hypocenter in each city, stated to be 15 m in Hiroshima, 23 m in Nagasaki. Since these are the standard errors of each coordinate, we can obtain the root mean square distance from the true to the estimated hypocenter by multiplying by $\sqrt{2}$

ただし、 σ_3 は原爆時の位置に関する報告における任意で偏りのない誤差からくる空気線量推定値における誤差の要素を表わす。

偏りにおける差は、わずか .05 L 単位で、これは両市で僅々1メートルにすぎないので、無視できる。残念ながら、これは2回における偏りの差にすぎないので、各回における偏りが必ずしも小さいものであったとは保証されない。しかしながら、われわれは資料がないので偏りを無視し、われわれの誤差の最終的な推定値は高すぎるというよりも低すぎるというほうがより可能性が強いことを注目しておく。

爆心地の位置の不正確さによる寄与

爆心地からの距離にわずか25mの差があっても、それは広島は総空気線量で12.5%、長崎で10%の差に相当する。たとえ被爆者の位置が正確にわかっているとしても、爆心地の推定位置に25mの誤差があれば、ある被爆生存者の推定線量は10%-12%高すぎ、ある被爆者のそれは同じ率ほど低すぎることになり、その他の者は入射角度の関係によってより少なく変化するであろう。もし分散 V によって測定された爆心地の位置が不正確であれば、結果的に出てくる被爆者の爆心地からの距離の分散は、不正確さの結果として近似的に $V/2$ になるだろう。(事由については付録参照)。

ここでは Hubbell ら¹¹ が示した資料および解析に従って考えてみよう。これらの著者は、炸裂点の高さは広島では 580 ± 15 m、長崎では 504 ± 10 m と推定されると述べている。1200 m においては、広島では炸裂点の高さが15 m 増加すれば直線距離は6 m だけ増加し、長崎では炸裂点の高さが10 m 増加すれば直線距離は3 m だけ増加する。炸裂点の高度の増加(減少)はその都市(いうまでもなく同等でなく)における被爆者全員の直線距離を減少(増加)させるので、炸裂点の高度の誤差によって、各被爆者が受けた相対的線量に生じ得た差はごくわずかなものであり、われわれはこの問題を本調査の目的には重要でないものとして、無視することとする。

しかし、Hubbell ら¹¹ は、両市における推定爆心地の座標の標準誤差を、広島では15 m、長崎では23 m として示している。これらは各座標の標準誤差であるから、 $\sqrt{2}$ を掛ければ真の爆心地から推定爆心地までの距離の2乗平均の平方根が得られる。

We have now to divide by $\sqrt{2}$ to transform into the root mean square error of distance from survivor to the hypocenter, thus obtaining

$$\sigma_4 (H) = 15 \text{ m,}$$

Contribution from Rounding or Imprecision in Recording Location of the Survivor

Air doses are calculated by computer from the coded information supplied. In particular, location of the survivor ATB is recorded on the dosimetry tape in coordinates referred to the relevant US Army maps, series AMS L902. These maps are constructed on a 1000 yard grid (i.e., one unit represents 1000 yards). The code employed utilizes two decimals, that is, specifies location in each coordinate only to the nearest 10 yards. However, review of the data on the tape reveals that, in fact, some cases are coded only to a single decimal. A hand tabulation revealed the following among ST100 cases with dose estimates:

	Total 総数	Hiroshima 広島 <1600 m	Nagasaki 長崎 <1800 m
Number tabulated 集計例数	320	177	143
Both terminal digits zero 小数第1位と第2位ともに0	32	17	15
%	10.0	9.6	10.5

The terminal digits (second decimal) of the two coordinates for a survivor ought each to be about equally distributed among the 10 possibilities, so that only 1 survivor in 100 would be accurately placed by a pair of coordinates both of which terminated in zero. However even among the closest survivors, for whom accuracy of recording is greatest, 10% have both terminal digits zero and must be accounted as being recorded not to the nearest 10 yards, but to the nearest 100 yards on each coordinate.

Following the same line of argument as employed previously the error variance of the distance from a survivor to any fixed point is equal to the variance of a single coordinate. The variance of a unit uniform distribution is $1/12$. Therefore, the net estimate of variance due to rounding, or imprecision of recording coordinates is

$$\frac{(0.9) \times (10)^2}{12} + \frac{(0.1) \times (100)^2}{12} = 90.83$$

次に $\sqrt{2}$ で割って、被爆者から推定爆心地までの距離の2乗平均の平方根の誤差に変換し、次の値を得る。

$$\sigma_4 (N) = 23 \text{ m.}$$

被爆者の位置の記録における概算記載または不正確性による寄与。

空気線量は提供された符号化資料をもとにコンピューターによって算定される。特に原爆時における被爆者の位置は、関連米国陸軍地図AMS L 902集に示されている座標を用いて線量推定用テープに記録される。これらの地図は、1目盛り1000ヤード(約914 m)で作られている。すなわち、1単位は各1000ヤードを表わす。利用された符号には小数第2位が用いられている。すなわち、座標内の位置が10ヤード単位まで示されているにすぎない。しかし、テープに収録された資料を検討すれば、実際には、小数第1位までしか符号化されていない例があることが認められる。手集計したところ、ST 100で線量推定値の得られている者では次のことが明らかになった。

各被爆者に対する二つの座標の最終桁(小数第2位)は、10の可能性の間でそれぞれほぼ平等に分布するはずであるから、両方とも小数第2位が0で二つの座標が正確に置かれるのは、100例のうちわずか1例にすぎない。しかし、記録の正確度が最も高い至近距離被爆生存者でさえも、小数第1位と第2位がともに0である者は10%であり、それらは各座標で、10ヤード単位でなく100ヤード単位で記録されたものとして考えなければならない。

上記で述べたと同様の論拠に従えば、被爆者からある地点までの距離の誤差分散は単一座標の分散に等しい。一様分布の分散は $1/12$ である。したがって、丸め過程または座標の記録不正確による分散の正味推定値は、

and the square root of this number, 9.53 is the standard error, in yards. Converting to meters we obtain, for both cities,

$$\sigma_5 = 9 \text{ m.}$$

Recapitulation

We have now identified a number of sources of possible error in individual dose estimates under the T65 dosimetry system and somehow derived estimates of magnitude for those that seemed to be most important:

Source	誤差源	Hiroshima 広島	Nagasaki 長崎
9-parameter formula	9パラメーター方式	19 m	25 m
Evaluation of parameters	パラメーターの評価	8	10
Distance from hypocenter	爆心地からの距離	38	50
Location of hypocenter	爆心地の位置	15	23
Rounding	丸め過程	9	9
Total	合計	47	62

The total is obtained, of course, as the root of the sum of squares of the individual error estimates. We emphasize again that we make no claim that these estimates are "correct". Reflecting on how they were derived it seems not unlikely that we have underestimated. However, our purpose has been to try to establish just which ball park are we in, and we conclude that the error parameter is at least 50 m.

In terms of percentage of air dose, the standard error of 47 m in Hiroshima corresponds to 28% of dose; while 62 m in Nagasaki corresponds to 29% of dose. Thus, we can conclude that the standard errors of the doses in the two cities arising out of the sources identified in this section amount to about 30% plus or minus, in both cities.

であり、この数の平方根9.53はヤード単位の標準誤差である。メートルに換算すると、両市とも次の値が得られる:

要約

われわれは、T65D線量推定方式によって得られる個人線量推定値における誤差源を確認し、そして最も重要と思われるものの大きさを推定した:

もちろん、この「合計」は、各誤差推定値の2乗の和の平方根として求められる。われわれは、これらの推定値が「正しい」ものであると主張しているのではないことを、あらためて力説する。推定方法にかんがみて、われわれが過少評価しているようには思われぬ。その目的は、概算値を求める試みであり、われわれは、誤差パラメーターが少なくとも50mであると結論する。

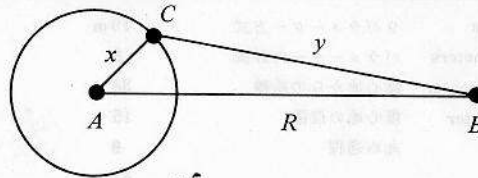
これを空気線量の百分率でいえば、広島標準誤差47mは線量の28%に相当し、長崎での62mは線量の29%に相当する。したがって、本節に述べた誤差源による両市における線量の標準誤差は、両市とも合計約±30%になる。

RELATION OF VARIANCE OF HYPOCENTER LOCATION TO VARIANCE OF ESTIMATED DISTANCE FROM HYPOCENTER

In the diagram, suppose the true hypocenter is at the point A , the survivor at point B and the hypocenter is estimated to be at point C . Then R is the true and y the estimated distance of the survivor from the hypocenter. We suppose that all points on the small circle at distance x from the hypocenter are equally likely to be selected as the estimated hypocenter; the variance of x itself will be independently given.

爆心地の位置の分散と、爆心地からの推定距離の分散との関係。

図では、真の爆心地が A 点にあって、そして被爆地点が B 点にあり、推定された爆心地が C 点にあるものと仮定する。すると R は爆心地から被爆者までの真の距離であり、 y は推定距離である。爆心地からの距離 x における小円周上のすべての点が、推定爆心地として同等に選定される可能性があるとするれば、 x 自体の分散は独立に示される。



If θ is the angle CAB , then our assumption is that θ is uniformly distributed. We can express y in terms of x , R and θ as:

θ を角 CAB とすれば、 θ は一様に分布すると仮定される。
 y は x , R および θ により、次のように表わされる:

$$y = (x^2 + R^2 - 2xR \cos \theta)^{1/2}$$

$$y^2 = x^2 + R^2 - 2xR \cos \theta.$$

Since the circular integral of $\cos \theta$ is zero we get easily

$\cos \theta$ の円形積分は 0 であるので、次の値が容易に得られる。

$$E(y^2) = x^2 + R^2.$$

To obtain $E(y)$, we write

$E(y)$ を得るには、次の式を用いる。

$$y = (x^2 + R^2)^{1/2} \cdot \left(1 - \frac{2(x/R) \cos \theta}{1 + x^2/R^2} \right)^{1/2}$$

Now x is a number such as 20, 30, or 40 m or so, while R , typically, is 1000 to 1600 m in the range that concerns us. The ratio x/R is, therefore, very small, and we can expand the second factor by the binomial theorem getting

x は 20, 30 または 40 などのような数値であるが、 R の典型的な値はわれわれが問題にする範囲では 1000 - 1600 m である。したがって、 x/R の比はきわめて小さいので、二項定理によって第 2 項を展開して、次の値を得ることができる。

$$y = (x^2 + R^2)^{1/2} \left(1 - \frac{x/R}{1 + x^2/R^2} \cdot \cos \theta - \frac{1}{2} \frac{(x/R)^2}{(1 + x^2/R^2)^2} \cdot \cos^2 \theta + \dots \right)$$

where the omitted terms are vanishingly small. We can now take expected values over θ . Since

ただし、省略した部分はきわめて小さい。そこで θ の上での期待値をとることができる。

$$E(1) = 1$$

$$E(\cos \theta) = 0$$

$$E(\cos^2 \theta) = E(\sin^2 \theta) = 1/2$$

therefore,

$$E(y) = (x^2 + R^2)^{1/2} \left(1 - \frac{1}{4} \frac{(x/R)^2}{(1 + x^2/R^2)^2} \right)$$

であるから,

Then the variance of y is given by

$$V(y) = (x^2 + R^2) \left(\frac{1}{2} \frac{(x/R)^2}{(1 + x^2/R^2)^2} - \frac{1}{16} \frac{(x/R)^4}{(1 + x^2/R^2)^4} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{x^2}{1 + x^2/R^2} - \frac{1}{16} x^2 \frac{(x/R)^2}{(1 + x^2/R^2)^3}$$

そこで y の分散は次のように与えられる。

Since x/R is small, we have that, very nearly,

$$V(y) = \frac{1}{2} x^2$$

x/R は小さいので, x を固定した場合に, ほぼ次の式が得られる。

for fixed x , and now taking expected values over x , we obtain

$$V(y) = \frac{1}{2} E(x^2).$$

ここで x の上での期待値をとれば, 次のようになる。

In point of fact, what is really wanted is not the variance of y but the mean square error $E(y - R)^2$; however, since the bias in y is of the second degree in the ratio x/R , it turns out that the mean square error and the variance are equal to the first order of approximation.

事実, 真に必要なのは y の分散ではなく, 2乗平均誤差 $E(y - R)^2$ であるが, y における偏りは比 x/R の2次項について表わされるから, 2乗平均誤差および分散は近似式の第1項までは等しくなる。

PLANS FOR THE FUTURE: SHIELDING WORK AND THE SHIELDING SECTION

Excerpts from Memorandum to Dr. Darling from Seymour Jablon dated 26 March 1963

Introduction. ABCC has been conducting shielding studies for many years as a part of a collaborative effort with ORNL and, more recently, the National Institute of Radiological Sciences, to establish

将来の計画: 遮蔽調査および遮蔽調査課

Seymour Jablon より Dr. Darling への1963年3月26日
つけ覚書の抜粋

緒言. ABCC は, 広島および長崎における被爆者の推定放射線量を決定する目的で, 長年の間ORNL と, また最近では放射線医学総合研究所(放医研)との共同研究の

radiation dose estimates for the Hiroshima and Nagasaki survivors. The present goal of accomplishing a shielding study on every survivor who was within 2000 m from the hypocenter has been reached in Nagasaki but is far from realization in Hiroshima. In recent months a variety of developments have made it seem desirable to consider anew whether the goal for Hiroshima is reasonable under present conditions, and if not, what modifications might be made. The aim of this memorandum is to summarize the situation as I see it and to present to you recommendations for certain changes.

The Present Position. In Nagasaki, dose estimates on the T57 system are available on punch cards for 5037 persons (Tab. 01228-2) of whom 3888 are in the ST100 (Life Span) sample (Tab. 01223). This number is 57% of the 6801 Nagasaki survivors in the <2000 m component of the ST100 sample. In addition, about 325 so-called "globe cases" have been done in Nagasaki, for whom only neutron dose estimates can now be made. It is expected, however, that after completion of the BREN analyses in the summer of 1963, the numerically more important gamma dose estimates will become available.

The Nagasaki Shielding Section, at its greatest strength (Winter 1960-61) numbered 11 persons, including the Assistant Division Chief in charge. With the completion of histories and drawings for persons for whom T57 estimates could be made (including globe cases) the strength was reduced to six, including supervisor. The six persons have been doing all of the globe calculations for Hiroshima as well as Nagasaki; a study of the accuracy and reproducibility of the shielding studies was made (which will be referred to below); studies were made of certain survivors who were located in the Mitsubishi machine shops ATB, and for whom Dr. Hubbell thought there was a good possibility that a method of making dose estimates could be achieved. Beyond these tasks, the six are called upon by the Field Division generally for assistance. It is planned ultimately to merge the Shielding Section into the Field Section, but it has seemed desirable to maintain a core of people who could organize what efforts might ultimately be required to convert the shielding histories into dose estimates when the results of BREN analysis and other present efforts become available.

In Hiroshima, on the other hand, we are far from achieving the goals originally established. We have on punch cards 14,747 (Tab. 01228) T57 dose estimates. Of this total, 11,108 are in the ST100 sample, or 52% of the 21,329 persons in that

一環として遮蔽調査を行なっています。爆心地から2000 m未満にいた各被爆者について遮蔽調査を完了するという目標は、長崎では達成されていますが、広島では実現からほど遠いものであります。ここ数か月間における経緯から判断して、広島に対する目標は現状のもとでも妥当であるかどうか、また妥当でないとすればどのような変更を行なうべきかについて、あらためて考え直す必要があるように思われます。本書の目的は、小生のみとこころを要約し、特定の変更を行なうよう勧告することにあります。

現況。長崎では、5037人 (Tab. 01228-2) について T57D 線量推定値のパンチカードが作成されていますが、そのうち3,888名はST 100 (寿命調査) の対象者であります (Tab. 01223)。この数は、長崎のST 100 集団中の2000 m 未満群6801名の57%に当たります。そのうえ長崎では、いわゆる「グローブ対象例」325名の算定が完了していますが、これらの例については、中性子線量の推定のみが可能です。しかし、1963年夏におけるBREN 計画解析の完了後は、数値的により重要なガンマ線量推定値が得られるようになるものと期待されます。

長崎の遮蔽課の人員は、最も増強されたとき(1960-61年冬)には、担当の課長補佐を含めて11人でした。T57推定が可能な例(グローブ対象例をも含む)の調査記録および図面の完成により、人員は課長を含めて6人に削減されました。この6人は広島・長崎両市のすべてのグローブ算定を行なっています。遮蔽調査の正確性および再現性に関する調査が行なわれました(下記を参照); 原爆時三菱機械工場にいた特定の被爆者について調査が行なわれましたが、Dr. Hubbell は、それらの例についての線量推定の方法が得られる可能性は十分にあると考えています。前記6名は、上記の作業のほかに調査課の求めに応じて援助しています。最終的には遮蔽課と調査課を統合する予定ですが、BREN 計画の解析および他の作業の結果が得られるようになったときには、遮蔽記録を用いて線量推定値を算出する作業を行なえるよう主要な人々を確保する必要があるように思われます。

一方、広島では、初期の目標にはほど遠いものがあります。14,747人 (Tab. 01228) についてはT57D線量推定値のパンチカードが作成されています。この総数のうち、11,108例はST 100対象例で、すなわち、これは同集団中、

sample, located within 2000 m of the hypocenter. What is more to the point is that, as of 31 January 1963, there were 6177 ST100 shielding studies still remaining to be done. Of these, only 79 were members of the ME200 subsample, so that, for the Adult Health Study (and also In Utero Study), effectively, shielding studies have been finished.

Within the ST100 group now being worked on, attention has focussed on those located near to the hypocenter. The present "priority group" includes all persons less than 1600 m from the hypocenter, plus a random sample of 30% of persons in the 1600-1999 m zone. As of 31 January 1963, about 1900 cases remained to be done in the priority group.

In recent months the Hiroshima Shielding Unit has been able to dispose of about 310 cases per month. Of these about 235 (76%) are completed, either with T57 dose, or as "Globe Cases" while about 75 cases each month are, after investigation, declared "impossible". This latter group is composed in about equal parts of persons for whom no shielding interview is possible because they have moved or have died, and of persons for whom an interview is possible but who were in trains, concrete structures, or other situations for which dose estimates cannot be provided.

Therefore, if the production rates were maintained, to complete the current priority group, 8 months would be required at a minimum, while to complete the whole number outstanding would take more than 2 years.

Errors in Dose Estimates - General. Dose estimates are subject to at least three kinds of error, which are qualitatively different. These are:

Errors in the estimates of the original yield of the weapons, that is, in the air dose curves.

Errors in estimates of the parameters of the dose estimation method, that is, in attenuation factors for materials and position, angular distribution of incoming radiation, and the like.

Errors in the shielding histories themselves, that is, in the distance from the hypocenter, whether the person was behind a building or not, exactly where he was in a house, and so forth.

The three types of error have rather different implications for our studies. The first type is important in that if the air dose curves are in error,

爆心地から2000 m未満にいた21,329例の52%に当たるものです。端的に言えば、1963年1月31日現在では、ST-100集団中6177例の遮蔽調査がまだ残っていたということでもあります。これらのうち、79例のみがME 200集団に属するもので、成人健康調査(ならびに胎内被爆者調査)については、遮蔽調査は事実上完了しています。

現在、ST 100対象群のうち、爆心地に近かった者を重点的に調査しています。この「優先群」には、爆心地から1600 m未満の者全員と、1600-1999 m地域にいた者の30%任意抽出群が含まれます。1963年1月31日現在、優先群中約1900例がまだ調査されていません。

最近数か月、広島遮蔽課では1か月当たり約310例を処理しています。これらのうち、約235例(76%)は、T 57D線量または「グローブ対象例」として完了されていますが、毎月約75例が調査後「不可能」例とされています。後者は、転出または死亡により遮蔽面接調査が不可能な者、および面接は可能であるが列車やコンクリート建築の中またはその他の状況下にあったため線量推定値が得られない者で、その数はそれぞれほぼ同数であります。

したがって、もし現在の成果率が維持されれば、現在の優先群を完了するためには少なくとも8か月が必要ですが、全例を完了するには2年以上かかると考えられます。

線量推定における誤差 - 全般的。 線量推定には、少なくとも3種類のそれぞれ異なる誤差があります。すなわち、

原爆の収量の推定、すなわち空気線量曲線における誤差。

線量推定法のパラメーターの推定、すなわち、物質および位置にかかわる減弱係数、放射線入射角などの分布における誤差。

遮蔽記録自体、すなわち、爆心地からの距離、建物の背後にいたかどうか、屋内の正確な位置などにおける誤差。

この3種類の誤差は、われわれの調査では異なった意味をもっています。第1型の誤差は、空気線量曲線に誤差

our estimates of the biological effect of radiation in man, per rad, will be in error by an equal factor, apart from other sources of error in our measurements. Presumably an error in the air dose curves would apply to all survivors proportionately. Therefore, if the question is merely one of deciding whether a given kind of effect is seen to be produced by radiation in Hiroshima and Nagasaki, there is no problem. The problem arises at the level of trying to estimate the dose response curve. Thus, both for leukemia and for acute radiation injury present data on T57 dose estimates seem to imply that Nagasaki rads are about twice as effective as Hiroshima rads. This conclusion does not seem plausible and as it happens, the probable errors given for the York air dose curves are amply large enough to account for the discrepancy. The most recent data available to me on this subject is contained in the unclassified document ORNL-LR-DWG 6836IR, and is as follows:

があれば、その他の測定誤差源を別にして、人体における放射線の生物学的影響のrad当たり推定値にも、同じ係数によって誤差が生ずるという点で重要であります。空気線量曲線における誤差は、おそらく全被爆者に同等にあてはまると考えられます。したがって、広島および長崎の放射線によって、ある種の影響がもたらされているか否かを決定するだけであるならば、この誤差を問題にする必要はありません。問題は、線量反応曲線を推定する段階で生じます。したがって、白血病および急性放射線傷害については、T57D線量推定値から見れば、長崎のrad線量が広島のrad線量の約2倍の効果をもつようであり、この結論は納得できるものとは思われませんが、偶然にもYork空気線量曲線に関する確率誤差はその差を説明するには十分なものであります。この問題に関して小生が入手している最近の資料は公開記録ORNL-LR-DWG 68361Rに含まれているが、これは次のとおりであります。

YIELD UNCERTAINTIES

収量の不確定性

			Neutron 中性子	Gamma ガンマ
Present 現在	Nagasaki	長崎	± 50%	± 40%
	Hiroshima	広島	± 100%	± 50%
June 1963 (After completion of calculations) 1963年6月(算定完了後)	Hiroshima	広島	± 25%	± 25%
	Nagasaki	長崎	± 25%	± 25%

The exact meaning of the ranges given is not clear (they surely cannot be simple probable error ranges) but it seems not unreasonable to suppose that even after June 1963, the discrepancy between Hiroshima and Nagasaki may well be in excess of 50%. Nevertheless, despite these uncertainties, there is no difficulty about relating the incidence of leukemia or the acute radiation syndrome to radiation in each city - the difficulties are entirely at the level of putting particular numbers into our description of the process, and comparing the cities.

示された範囲の正確な意味は明らかではありません(それらは確かに単純な確率誤差範囲にはありえませんが)1963年6月以後でさえも、広島・長崎間の差が50%以上になりうると考えることは不合理なこととは思われません。しかし、これらの不確定性にもかかわらず、白血病または急性放射線症候群の発生率と両市における放射線量との関連を認めることについては困難はなく、困難はただ過程の記述に特定の数値をあてはめ、両市の比較を行なう段階にのみ生じます。

Errors of the second kind have quite different implications. There is no reason to suppose that they will disturb comparisons between cities. Moreover, as long as attention is confined to the numerically most important class of survivors (those shielded in ordinary houses of light wooden construction) presumably errors would affect all survivors nearly proportionately, so that, again, the difficulty would be in estimating the numeric parameters of the dose response curve, for any particular

第2型の誤差には全く別の意味があります。それらが両市間の比較をさまたげると考える理由はありません。その上、数的に最も多い群の被爆生存者(通常家屋内で遮蔽された者)にのみ注意が向けられている限り、おそらく誤差は全被爆者にほとんど一様に影響すると思われるので、影響の有無の決定には困難はなく、むしろ特定の影響に関する線量反応曲線の数値的パラメーターを推定

effect, rather than in deciding whether an effect existed at all. In the presence of possibly large errors, however, one would be reluctant to merge survivors who were exposed in different shielding situations. The ORNL statement of the uncertainties, taken from the source previously mentioned applies to the two cities equally:

SHIELDING UNCERTAINTIES
遮蔽の不確定性

	Neutron 中性子	Gamma ガンマ
Present 現在	±25%	±25%
After BREN analysis BREN 計画解析以後	±10%	±10%

This table is rather puzzling in that a single figure is given without regard to the shielding configuration. It may be that the uncertainty relative to attenuation in a wooden house is the same as that relative to exposure in the open in a partially shielded location, but this would be a remarkable coincidence. Be that as it may, errors with respect to particular shielding configurations would not be expected to disturb comparisons between survivors within the same configuration but would adversely affect comparisons between survivors in different configurations.

Errors of the third kind - those in the shielding histories themselves - are not considered in the ORNL statement quoted above. The effect of such errors is qualitatively different from that of errors of the first and second kind which, as remarked above, do not interfere with our ability to detect radiation effects. The effect of errors of the third kind is to *reduce the apparent effect of radiation*. Table A1 provides a highly simplified example of how this works.

することに困難があります。しかし、かなり大きい誤差があるので、種々の遮蔽状態で被爆した者を一群にまとめることは好ましくありません。不確定性に対するORNLの見解(出所は前述)は、両市に等しくあてはまります。

上の表は、遮蔽状態を無視して単一の数字が示されている点で、いささかわかりにくく当惑させられます。それは、木造家屋内の減弱に関する不確定性は戸外の部分的に遮蔽された場所で被爆した場合の不確実性と同じであるということかもしれません、これは注目すべき一致であります。それはともかく、ある遮蔽状態における誤差は、同じ遮蔽状態の被爆者の比較をさまたげるとは思われませんが、異なった遮蔽状態で被爆した者の比較に影響することが考えられます。

第3型の誤差—遮蔽記録自体における誤差—は、上に引用したORNL報告では考慮の対象にされていません。この誤差の影響は、放射線影響の探知をさまたげない上記の第1および第2型の誤差による影響とは質的に異なるものであります。第3型の誤差の影響は、放射線の影響を減少させることにあります。表A1には、この影響がいかなるものかを示すきわめて簡単な例を掲げました。

TABLE A1 EFFECT OF TWO KINDS OF ERROR IN DOSE ON ASSESSMENT OF "X" OGENIC EFFECT OF RADIATION

表A1 放射線の“X”影響の評価に及ぼす線量に関する二つの誤差の影響

	True Situation 真の状態		Type 1 Error 第1型誤差		Type 3 Error 第3型誤差	
	A	B	A	B	A	B
Actual dose in rad Rad 単位の真の線量	4	20	4	20	8	16
Estimated dose in rad Rad 単位の推定線量	4	20	2	10	4	20
Number of persons 対象者数	100	100	100	100	100	100
Cases of "X" "X"の例数	16	32	16	32	20	28
Excess cases in B B群における過剰例		16		16		8
Difference in estimated dose. rad 推定線量(rad)の差		16		8		16
Cases per rad Rad 当たり例数		1		2		0.5
Background rate バックグラウンドの率		12		12		18

It is assumed in Table A1 that two groups, A & B, of 100 persons each were subjected respectively to 4 rad & 20 rad. It is assumed that "X" occurs at a rate of $12 + R$ per hundred, where R is in rad. In the first set of columns can be seen how we estimate the dose-response curve to be $12 + R$, which is correct. Under type 1 error, can be seen that if we err in setting all dose values too low, we obtain the curve $12 + 2R$. The coefficient of the R term (cases per rad) has been misestimated, but the background rate is correctly evaluated and the test for significance of the relationship of effect to dose is numerically exactly what it should be. Under type 3 error, however, all is different. We assume that by shielding error, 25% of each group are mistakenly assigned to the other group. We then obtain a dose response curve of $18 + R/2$, so that the background rate is overestimated by 50%, the number of cases per rad is underestimated by 50% and the significance test result would be sharply reduced. Conclusion: The three kinds of error have different results, and the existence of relatively large error of type 1 does not mean that it is foolish to attempt to reduce type 3 error. However, if type 3 error be very large, the dose estimates will be valueless no matter how low the type 1 and type 2 errors.

Errors of Type 3. We have but a single body of data directly applicable to the assessment of type 3 error. In 1961, with the completion of the priority shielding work in Nagasaki, Mr. Cheka urged a test of the accuracy of the shielding work there. Accordingly, a sample of 92 cases was selected, 42 from the year 1954 and 50 from 1959. The sample was selected about equally from five ranges for the original total dose estimate: 0-49; 50-99; 100-199; 200-399; and 400-999 rad.

For 4 cases, total dose estimates could not be made. In two cases, which had carried total dose estimates of 10 rad and 7 rad, re-interview disclosed that the patient had been shielded by earth, hence no dose estimate was possible. In two more cases, with previous total dose estimates of 84 rad and 472 rad, it was determined that globe studies should have been done. These have been done, and the new neutron estimates from the globe are little more than half of the former neutron values. How much the gamma estimate will change cannot yet be told.

Setting aside the 4 cases that were totally erroneous (4.3%) in order to make the material comparable with other data to be presented, the total doses are converted into a log scale called L scale. This scale, which is being used in ST100 for tabulating purposes,

表A1では、100例ずつから成るA・B二つの群はそれぞれ4 rad および20 rad を受けたものと仮定されています。また、“X”は100当たり $12 + R$ の率で生ずると仮定します。ただし、 R はrad単位であります。最初の欄では、どのようにして線量反応曲線を $12 + R$ （これは正確）と推定するかがわかります。第1型の誤差のもとでは、すべての線量値を誤ってあまりに低く設定する場合、 $12 + 2R$ 曲線が得られることがわかります。 R の係数（rad当たり例数）は誤って推定されているが、バックグラウンドの率は正しく評価されており、影響と線量との関係の有意性検定は、数値的には正しいものです。しかし、第3型の誤差のもとでは、すべてが異なります。遮蔽の誤差により各群の25%は誤って他の群へ割り当てられることとなります。ついで、 $18 + R/2$ の線量反応曲線が得られるので、バックグラウンドの率は50%ほど過剰に推定され、rad当たりの例数は50%過少推定されて、有意性検定の結果は著しく減少します。結論：3種類の誤差には相異なる結果があり、比較的大きい第1型の誤差があるからといって、第3型の誤差を減少させる試みが愚かであることにはなりません。しかし、第3型の誤差が非常に大きい場合は、第1および第2型の誤差がいかに低いものであろうと線量推定値は価値がありません。

第3型の誤差。 われわれには、第3型の誤差の評価に直接適用できる資料は、一つしかありません。1961年には長崎において優先的に行なわれた遮蔽調査が完了し、Cheka氏は同地における遮蔽調査の正確性検定を勧めました。そこで、92例の対象群が選定されました。すなわち、1954年度からは42例、1959年度からは50例であります。最初の総線量推定値に対して対象群は次の五つの線量区間から同数に選定されました。すなわち、0-49; 50-99; 100-199; 200-399; 400-999 radであります。

総線量推定値の得られなかったものが4例あります。総線量推定値がそれぞれ10 rad および7 rad であった2例においては、対象者が大地に遮蔽されていたために線量推定が不可能であったことが再面接調査で明らかになりました。以前の総線量推定値が84 rad および472 rad である残り2例については、グローブ調査が行なわれるべきであると判定されました。その調査を行なった結果、新しい中性子推定値は元中性子値の半分にすぎませんでした。ガンマ推定値がどれほど変化するかはまだ判明していません。

明らかに誤差のあった(4.3%)4例を除外して、資料と提示する他の資料とを比較できるようにするため総線量を対数、いわゆる L スケールに変換します。ST100で集

THE L SCALE

Lスケール

L	Dose 線量	L	Dose 線量	L	Dose 線量
1	0.2	11	25.31	21	252.316
2	3	12	32.39	22	317.399
3	4	13	40.49	23	400.503
4	5	14	50.62	24	504.634
5	6.7	15	63.78	25	635.799
6	8.9	16	79.99	26	800.1007
7	10.11	17	100.125	27	1008.1269
8	12.15	18	126.158	28	1270.1599
9	16.19	19	159.199	29	1600.2015
10	20.24	20	200.251	30	2016+

TABLE A2 DIFFERENCES BETWEEN L SCALE VALUES FOR ORIGINAL DOSE ESTIMATES AND REVIEW

表A2 Lスケールでみた元の線量推定値と再推定値との差異

Review L Value Minus Original 再推定L値と元の値との差	Number 例数	Percent
+6	1	1.1
+5	1	1.1
+4	1	1.1
+3	-	-
+2	2	2.3
+1	9	10.2
0	57	64.8
-1	12	13.6
-2	3	3.4
-3	2	2.3
Total 合計	88	99.9

has 30 steps, which increase by 26% from step to step. Three steps on the L scale exactly double the dose.

In terms of the L scale, the correspondence in the Nagasaki experiment between the former dose estimates and the new estimates, in the 88 cases for whom new estimates could be made, turned out as shown in Table A2. Values were the same in 65%, differed by one unit (plus or minus) in 24%, and differed by two units or more in about 11%. The average difference, taken without regard to sign, was 0.6 units, while the root mean squared difference was 1.24 units.

Correlation between Dose and Distance. It is well known that the T57 dose estimates are highly correlated with distance from the hypocenter. For persons who were in typical houses of light wood

計に用いられているこのスケールには30段階があり、段階ごとに26%ずつ増加します。Lスケール上の3段階ごとに線量は正確に倍増します。

新たに線量推定ができた長崎の88例について新推定値と旧推定値の一致をLスケールで調べたところ、表2に示したような結果が得られました。65%は値が等しく、24%に1単位の差(±1)、約11%に2単位以上の差がありました。(±)を無視して算出された平均差は0.6単位でしたが、差の2乗平均の平方根は1.24単位でした。

線量と距離との相関性。T57D線量推定値と爆心地からの距離との間に強い相関性のあることはよく知られています。典型的な軽木造家屋内にいた者(遮蔽分類群6)

TABLE A3 PERCENT DISTRIBUTION OF L SCALE VALUES BY DISTANCE, HIROSHIMA, SHIELDING CATEGORY 6

表A3 Lスケール値の百分率分布：距離別，広島，遮蔽分類群6

Distance 距離	L Scale スケール											Total 計	
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1600-1609 m								2	13	58	25	2	100
1610-1619								5	25	51	18	1	100
1620-1629								4	9	32	47	8	100
1630-1639									8	26	60	1	100
1640-1649									17	39	41	3	100
1650-1659									2	21	40	37	100
1660-1669				1					7	17	58	16	99
1670-1679	1								6	25	54	14	100
1680-1689					2	1			7	37	47	6	100
1690-1699									4	45	49	2	100

construction (Shielding Category 6) it could hardly be otherwise: The factors for transmission of gamma radiation vary only from about 88% to about 56% as house penetration distance varies from zero to 28 feet.* Between 4 feet and 20 feet, which range probably covers most survivors, the spread is only from about 83% to 63%. Variation for fast neutrons is greater (from 75% to 40%) but at distances larger than 1600 m the neutron component of total dose is but a small fraction, even in Hiroshima. These considerations seemed to give hope that if distance were specified to 10 m the dose estimates for persons in a given shielding situation might have very small spread. Tabulations have been made, and the accompanying Figure A1 shows the Hiroshima distribution from 1600 to 2000 m graphically. It is obvious that at any given distance, the L scale total dose values fall within a very narrow range. An extract from the tabulation is shown as Table A3.

It is apparent from the table and figure that the correlation is very close, since in every 10 m zone, at least 3/4 of all dose estimates are contained in no more than two L steps. It is also apparent that there are a number of "outliers" - cases that are so distant from the main body of data as to raise a suspicion of gross error. Accordingly, the cases were reviewed and all extreme cases being rechecked, a number of errors were found. The revised version of Table A3 appears as Table A4. Clearly, the effect of review was to remove most of the outliers.

In Table A3, the correlation between L value and distance is 0.674. The regression equation is:

$$L = 13.3 - (.025) X$$

*Ritchie & Hurst, Health Physics 1:390-404, 1959

についても、それは例外ではありえません。ガンマ線の透過係数は、家屋透過距離が0から28フィートへ変動するにつれて、約88%から約56%にのみ変動します。* おそらくほとんどの被爆生存者が含まれていると思われる4フィートから20フィートの間では、その範囲は約83%から63%まであります。速中性子ではその範囲がより大きく(75%-40%)、1600m以遠の距離では、総線量中、中性子が構成する割合は広島においてさえ小さいものがあります。以上の考察は、もし距離が10mまで正確であれば、ある遮蔽状態にあった被爆者の線量推定値の変動幅がきわめて小さいという希望を持たせます。集計を行ない、数字は、広島における1600-2000mの分布を図示しました。いずれの距離においても、Lスケールの総線量値は極小範囲にとどまることは明白であります。表A3は集計の抜粋です。

図表で明らかのように、各10m区分内では、すべての線量推定値の少なくとも3/4は2L段階以上に含まれていないので、相関性はきわめて密接であります。また、全体からあまりに離れているために、大きい誤差の疑いもたれている一群の「局外例」があることも明らかです。したがって、症例の検討が行なわれ、極端な例も再照合された結果、若干の誤差が認められました。表A3を修正し、表A4として示します。検討の効果は、明らかに局外例の大半を除外することになりました。

表A3では、L値と距離との相関は0.674であります。回帰方程式は次のとおりです。

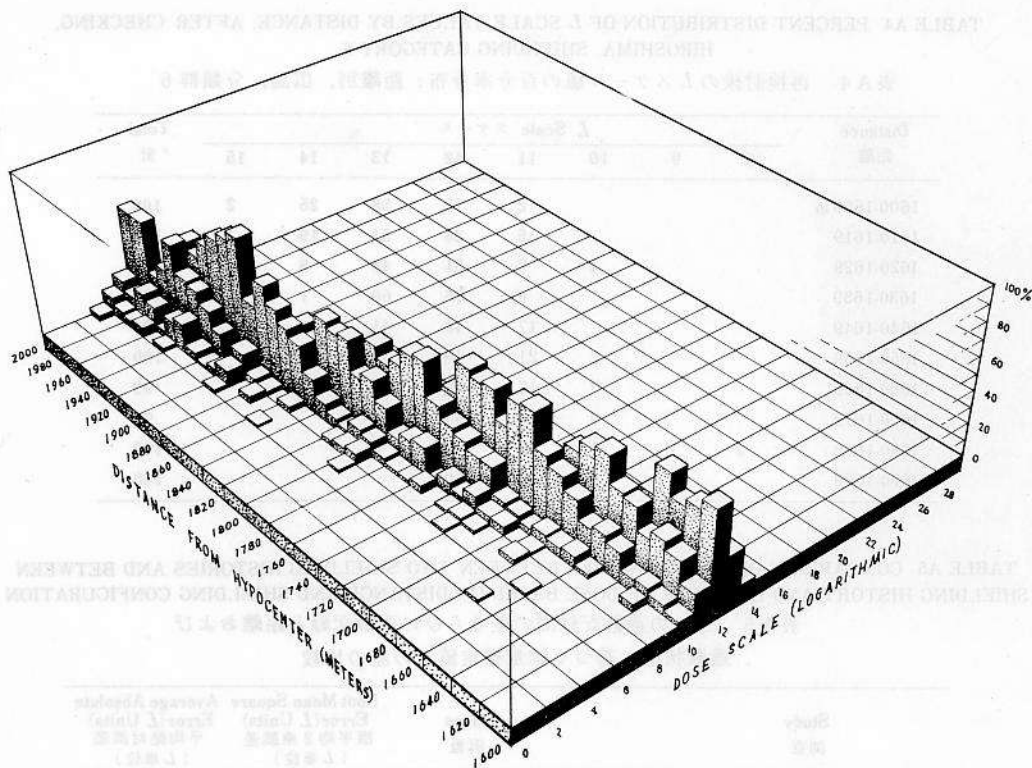


FIGURE A1 PERCENT DISTRIBUTION OF LOG DOSE BY DISTANCE, HIROSHIMA

Shielding Category: In Wood House

図A1 対数線量の百分率分布, 広島(遮蔽分類: 木造家屋内)

where X is the distance in meters measured from 1605 as the zero point. The standard error of estimate (variation around the regression line) is 0.75 units, while the average deviation, taken without regard to sign, was .66. In a word, the error made by estimating the dose in L scale from the regression equation on distance, is of the same order of magnitude as the average error discovered in a routine verification of shielding histories. The relevant numbers are summarized in Table A5.

Conclusions and Recommendations. The studies reported here are by no means conclusive. Additional computations will be made for other distance zones and other shielding categories. However, it seems plain that for the class of subjects studied here (Hiroshima survivors, 1600-1699 m, in wooden houses) the advantages in accuracy to be obtained by completing all shielding studies rather than estimating dose from distance, are by no means decisive, especially in view of the very large costs and difficulties encountered in making such studies. Parenthetically, it can be noted from Table A4 that

ただし、 X は1605を原点としてそこから測定されたメートル単位の距離です。推定値の標準誤差(回帰線からの変動)は0.75単位ですが、(±)を無視した平均偏差は.66でした。要するに、距離に関する回帰方程式に基づき L スケールで線量推定を行なうことによって生ずる誤差は、通常の遮蔽記録の検討で発見された平均誤差と同じ大きさのものであります。それに関する数値は表A5に要約しました。

結論および勧告。 今回報告する調査は、決して最終的なものではありません。その他の距離区分およびその他の遮蔽範囲については、追加計算を行なう予定であります。しかし、今回の調査対象であった広島の被爆者で1600-1699mの地点の木造家屋にいた者の群については、距離をもとに線量推定を行なうよりもすべての遮蔽調査を完了することによって得られる正確性についての利点は、特にこのような調査における膨大な経費や障害を考えれば、決して決定的なものではないことが明らかであるように思われます。ただし、表A4によれば、1600m以遠では、ほとんどすべての線量推定値は L 単位で13以

TABLE A4 PERCENT DISTRIBUTION OF L SCALE VALUES BY DISTANCE, AFTER CHECKING, HIROSHIMA, SHIELDING CATEGORY 6

表A4 再検討後のLスケール値の百分率分布：距離別，広島，分類群6

Distance 距離	L Scale スケール								Total 計
	8	9	10	11	12	13	14	15	
1600-1609 m				2	13	58	25	2	100
1610-1619				5	25	51	19	1	101
1620-1629			4	9	31	48	8		100
1630-1639				8	26	60	1	5	100
1640-1649				17	40	41	3		101
1650-1659			2	21	40	37			100
1660-1669			7	17	59	16			99
1670-1679		3	3	24	55	14			99
1680-1689	2	1	7	36	48	6			100
1690-1699			4	46	50				100

TABLE A5 COMPARISON OF DISCREPANCIES BETWEEN TWO SHIELDING HISTORIES AND BETWEEN SHIELDING HISTORY AND ESTIMATE OF DOSE BASED ON DISTANCE AND SHIELDING CONFIGURATION

表A5 二つの遮蔽記録間の差ならびに遮蔽記録と距離および遮蔽状態に基づく線量推定値との差の比較

Study 調査	Cases 例数	Root Mean Square Error(L Units) 根平均2乗誤差 (L単位)	Average Absolute Error(L Units) 平均絶対誤差 (L単位)
Nagasaki, recheck of shielding histories 長崎，遮蔽記録再検討	88	1.24	0.59
Hiroshima, linear regression of L scale on distance, category 6, 1600-1699 m 広島，距離に対するL尺の線形回帰， 分類群6，1600-1699 m	918	0.75	0.66

beyond 1600 m, almost all dose estimates are in L class 13 and lower, that is, less than 50 rad.

The requirement for dose estimates is now, not 3 years from now, with the Adult Health Study being tabulated for the second time and the Life Span Study for the third time.

On the assumption that the computations being made verify the results for 1600-1699 m, it is recommended that:

Remaining ST100 cases within 1600 m should be completed as soon as possible.

The Shielding Section be progressively reduced in size.

That after the remaining ST100 cases are finished, and the new dose estimates become available (promised for summer-fall 1963) the Shielding Sections in the two cities be abolished. A target date for this would be 31 December 1963.

下(すなわち，50 rad 未満)であることが認められます。

線量推定が心要とされるのは，成人健康調査としては2回目，寿命調査としては3回目の集計が行なわれている現在であって，今から3年後のことではありません。

1600-1699 m に対する結果を確認するための計算から判断して，次のように進言いたします：

未完了の1600 m 未満のST 100例は，できるだけ早く完了する必要がある。

遮蔽課の規模を漸次縮小する。

未完了のST 100例を完了し，新しい線量推定値が得られるようになった(1963年夏-秋を約束したい)後で，両市の遮蔽調査課を廃止する。廃止の目標年月日は1963年12月31日とする。

CORRELATION BETWEEN DISTANCE AND DOSE

Memorandum to Dr. Darling from Seymour Jablon
Dated 16 April 1963

Table A6 shows the result of analyses of regressions of log dose measured in *L* scale values on distance, specified to 10 m, separately for each of the 100 m bands from 1600 to 1999 m, and for each shielding category. In Hiroshima, the greatest absolute average error is 0.65 *L* scale units, or about 17%.

距離と線量との相関について

Seymour Jablon から Dr. Darling への1963年4月16日
づけ覚書

表A 6は、1600 m から1999 m までの区間のそれぞれの100 m 地帯に対して、*L* スケールで測定した対数線量の10 m ずつに細分した距離への回帰解析の結果を示すものであります。広島では、最大の平均絶対誤差は0.65 *L* スケール単位、すなわち約17%であります。

TABLE A 6 CORRELATION BETWEEN DISTANCE FROM HYPOCENTER (10 m SPECIFICATION) AND *L* SCALE T57 TOTAL DOSE, BY SHIELDING CATEGORY, DISTANCE, AND CITY

表A 6 爆心地からの距離(10m区分)と*L*スケールT57D総線量との相関: 遮蔽分類・距離・都市別

Shielding Category 遮蔽分類	Distance from Hypocenter 爆心地からの距離							
	Hiroshima 広島				Nagasaki 長崎			
	1600-1699	1700-1799	1800-1899	1900-1999	1600-1699	1700-1799	1800-1899	1900-1999
1. "In Open Unshielded" 「戸外で遮蔽されていなかった者」								
Histories tabulated 集計した遮蔽記録数	308	161	142	98	60	77	52	52
Correlation coefficients 相関係数	.875	.818	.602	.907	.799	.685	.699	.639
Standard error of estimate(<i>L</i> -units) 推定値の標準誤差(<i>L</i> 単位)	.23	.39	.31	.21	.53	.54	.52	.46
Average absolute error(<i>L</i> -units) 平均絶対誤差(<i>L</i> 単位)	.13	.28	.24	.16	.32	.43	.31	.33
2. "In or Behind Building, but not completely Shielded" 「建物の内部または背後にいたが、完全に遮蔽されていなかった者」								
Histories tabulated 集計した遮蔽記録数	40	30	34	16	74	72	48	58
Correlation coefficients 相関係数	.636	.751	.741	.592	.580	.691	.549	.704
Standard error of estimate(<i>L</i> -units) 推定値の標準誤差(<i>L</i> 単位)	.57	.48	.49	.43	.73	.74	.68	.57
Average absolute error(<i>L</i> -units) 平均絶対誤差(<i>L</i> 単位)	.36	.36	.41	.34	.59	.59	.50	.47
4. "In Open but Totally Shielded by Building" 「戸外にいたが、建物によって完全に遮蔽されていた者」								
Histories tabulated 集計した遮蔽記録数	86	83	58	36	19	20	28	21
Correlation coefficients 相関係数	.474	.412	.402	.489	.134	.309	.062	.520
Standard error of estimate(<i>L</i> -units) 推定値の標準誤差(<i>L</i> 単位)	.70	.87	.81	.82	1.12	.70	2.05	.53
Average absolute error(<i>L</i> -units) 平均絶対誤差(<i>L</i> 単位)	.54	.65	.64	.59	.92	.56	1.40	.41
6. "Shielded Totally by Wooden or Light Frame Building" 「木造または軽量骨の建物によって完全に遮蔽された者」								
Histories tabulated 集計した遮蔽記録数	922	907	702	420	403	340	387	420
Correlation coefficients 相関係数	.538	.495	.537	.427	.488	.445	.481	.385
Standard error of estimate(<i>L</i> -units) 推定値の標準誤差(<i>L</i> 単位)	.82	.82	.79	.78	.75	.80	.79	.63
Average absolute error(<i>L</i> -units) 平均絶対誤差(<i>L</i> 単位)	.63	.61	.63	.60	.60	.63	.66	.52

Actually the tabulated data understate the closeness of the relation between log dose and distance:

If actual values of log dose were employed instead of *L* scale values, the correlation would increase and the standard error would, probably, be somewhat reduced.

If the correlation coefficients were calculated, not over the narrow subranges of 100 m, but over the whole 400 m range, the correlation coefficient would be much increased. However, for the problem at hand, the important question is not "How large is the correlation coefficient" but "How small is the average error committed in estimating log dose from distance" and these estimates are not affected.

I think that the results obtained are sufficiently good that I can renew the recommendation contained in the 26 March 1963 memorandum.

実際は、集計資料は対数線量と距離との関係の緊密性を過小表示しています。

*L*スケール値の代わりに実際の対数線量値が用いられていたならば、相関性は増大し、標準誤差はおそらくいくらか減少したと思われます。

相関係数を、狭い100 mごとの細分類地域ではなく、400 m全域にわたっても計算したならば、相関係数はもっと増加していたと思われます。しかし、この問題に対して、重要なことは、「相関係数はいかに大きなものであるか」でなく、「距離から対数線量を推定する際の平均誤差がいかに小さなものであるか」そして「いかにこれらの推定値が影響を受けていないか」ということにあります。

得られた結果は、非常によいので、1963年3月26日づけ覚書で述べた勧告をあらためて行ないたいと思います。

20	30	77	88	20	141	101	308
68	809	383	987	706	508	218	214
48	32	14	52	15	11	83	53
33	31	13	35	15	11	53	18
85	48	75	74	60	34	50	40
104	242	105	880	293	147	121	250
27	28	14	13	15	19	18	37
43	30	29	39	34	41	38	38
13	45	81	79	70	80	82	88
230	1301	309	131	489	103	212	424
83	202	70	112	83	81	37	70
41	140	32	35	50	48	23	44
120	387	346	402	450	103	607	551
252	181	242	488	532	231	400	258
83	47	89	35	27	30	28	32
25	88	88	89	80	83	18	31

REFERENCES

参考文献

1. AUXIER JA, CHEKA JS, HAYWOOD FF, JONES TD, THORNGATE JH: Free-field radiation-dose distribution from the Hiroshima and Nagasaki bombings. *Health Phys* 12:425-9, 1966
2. LORD PENNEY FRS, SAMUELS DEJ, SCORGIE GC: The nuclear explosive yields at Hiroshima and Nagasaki. *Philos Trans Soc London (A)* 266:357-424, 1970
3. UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE: The effects of nuclear weapons. Ed by S. Glasstone, Washington, USAEC, 1962
4. HIGASHIMURA T, ICHIKAWA Y, SIDEI T: Dosimetry of atomic bomb radiation in Hiroshima by thermoluminescence of roof tiles. *Science* 139:1284-5, 1963
5. HASHIZUME T, MARUYAMA T, SHIRAGAI A, TANAKA E, IZAWA M, KAWAMURA S, NAGAOKA S: Estimation of the air dose from the atomic bombs, Hiroshima-Nagasaki. *Health Phys* 13:149-61, 1967
6. CHEKA JS, SANDERS FW, JONES TD, SHINPAUGH WH: Distribution of weapons radiation in Japanese residential structures. USAEC Report CEX-62.11, 1965
7. JABLON S: Memorandum to Dr. Darling: Plans for the Future: Shielding Work and the Shielding Section. 26 March 1963. Department of Statistics Files
8. MILTON RC, SHOHOJI T: Tentative 1965 radiation dose estimation for atomic bomb survivors, Hiroshima - Nagasaki. ABCC TR 1-68
9. ISHIMARU T, HOSHINO T, ICHIMARU M, OKADA H, TOMIYASU T, TSUCHIMOTO T, YAMAMOTO T: Leukemia in atomic bomb survivors, Hiroshima-Nagasaki, 1 October 1950-30 September 1966. *Radiat Res* 45: 216-33, 1971
10. JABLON S, FUJITA S, FUKUSHIMA K, ISHIMARU T, AUXIER JA: RBE of neutrons in Japanese survivors. In Symposium on Neutrons in Radiobiology, USAEC Report CONF-691106, 1970. pp 547-77
11. HUBBELL HH, JONES TD, CHEKA JS: The epicenter of the atomic bombs. 2. Reevaluation of all available physical data with recommended values. ABCC TR 3-69