

RELATIONSHIP OF STATURE TO GAMMA AND NEUTRON EXPOSURE
AMONG ATOMIC BOMB SURVIVORS AGED LESS THAN 10
AT THE TIME OF THE BOMB, HIROSHIMA AND NAGASAKI

原爆時年齢が10歳未満であった被爆者の身長とガンマ線及び
中性子線被曝線量との関係，広島・長崎

TORANOSUKE ISHIMARU, M.D., M.P.H. 石丸寅之助

TAKAKO AMANO, M.D. 天野孝子

SADAHISA KAWAMOTO, M.D. 河本定久

In Cooperation with

協力者：

NOBUKO SHIMBA

榛葉信子



RADIATION EFFECTS RESEARCH FOUNDATION

財団法人 放射線影響研究所

A cooperative Japan - United States Research Organization

日米共同研究機関

ACKNOWLEDGMENT

謝 辞

The authors express sincere appreciation to Dr. William J. Schull, former RERF Vice-Chairman and Chief, Department of Epidemiology & Statistics, for advice and editing of the manuscript. They also thank Dr. Masanori Otake, Department of Epidemiology & Statistics for suggestions on the statistical analysis.

原稿の作成に当たり助言をいただき編集の労をとられた前放影研副理事長兼疫学統計部長 Dr. William J. Schull に深甚の謝意を表す。また、統計解析について示唆をいただいた疫学統計部大竹正徳博士に感謝する。

In the continued interest of accurately defining the late effects of the atomic bombs, the qualitative and quantitative characteristics of the A-bomb radiation exposure doses are periodically refined. If warranted by future dose assessments, the data reported here will be reanalyzed and subsequently reported.

原爆の後影響を引き続いて正確に究明する目的をもって、原爆放射線被曝線量の質的・量的特徴について定期的に改良を加えている。今後線量評価によって、その必要性が起これば、本報の資料を再解析の上、改めて報告する。

RERF TECHNICAL REPORT SERIES

放影研業績報告書集

The RERF Technical Reports provide the official bilingual statements required to meet the needs of Japanese and American staff members, consultants, and advisory groups. The Technical Report Series is not intended to supplant regular journal publication.

放影研業績報告書は、日米専門職員、顧問、諮問機関の要求に応えるための日英両語による公式報告記録である。業績報告書は通例の誌上発表論文に代わるものではない。

The Radiation Effects Research Foundation (formerly ABCC) was established in April 1975 as a private nonprofit Japanese foundation, supported equally by the Government of Japan through the Ministry of Health and Welfare, and the Government of the United States through the National Academy of Sciences under contract with the Department of Energy.

放射線影響研究所(元 ABCC)は、昭和50年4月1日に公益法人として発足した。その経費は日米両国政府の平等分担とし、日本は厚生省の補助金、米国はエネルギー省との契約に基づく米国学士院の補助金とをもって充てる。



RELATIONSHIP OF STATURE TO GAMMA AND NEUTRON EXPOSURE
 AMONG ATOMIC BOMB SURVIVORS AGED LESS THAN 10
 AT THE TIME OF THE BOMB, HIROSHIMA AND NAGASAKI

原爆時年齢が10歳未満であった被爆者の身長とガンマ線及び
 中性子線被曝線量との関係、広島・長崎

TORANOSUKE ISHIMARU, M.D., M.P.H. (石丸寅之助)¹; TAKAKO AMANO, M.D. (天野孝子)²;
 SADAHISA KAWAMOTO, M.D. (河本定久)³

In cooperation with
 協力者:

NOBUKO SHIMBA (榎葉信子)¹

Departments of Epidemiology & Statistics¹, Medicine², and Chief of Nagasaki Branch³

疫学統計部¹, 臨床部², 及び長崎支所長³

SUMMARY

A reanalysis has been undertaken of the relationship of attained adult height of Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivors aged less than 10 at the time of the bomb (ATB) to radiation dose based upon new dosimetry data. The present analysis aims to examine the relationship of stature to radiation dose in terms of gamma rays and neutrons, separately.

The 628 individuals were selected from Hiroshima and Nagasaki survivors, aged less than 10 ATB, whose doses were available, and whose statures were recorded at the Adult Health Study (AHS) biennial health examination during 1970-72.

To ascertain the relationship of attained adult stature to gamma and neutron doses three dose-response models were applied to the data. The analysis revealed that the attained height is a separate function of exposure to gamma rays and neutrons. The model assuming a squared term dependence on gamma rays and a linear dependence on neutrons provides a better explanation of the data. The regression coefficient associated with the squared gamma dose is -0.00000927 and the coefficient associated with neutron dose is -0.0172 . The relative

要約

原爆時年齢が10歳未満であった広島・長崎の被爆者の成人期の身長と、新しく開発された線量測定法に基づいて得た被曝線量との関係を再解析した。今回の解析は身長と被曝線量との関係をガンマ線量と中性子線量別に究明しようとして行った。

今回の解析のため広島・長崎の被爆者のうち、原爆時年齢が10歳未満で、被曝線量が判明し、1970-72年間に実施した成人健康調査の2年ごとの検診において身長が記録された者628名を選んだ。

成人期身長とガンマ線量及び中性子線量との関係を究明する目的で資料に三つの線量反応モデルを適用した。解析では、成人期身長はガンマ線及び中性子線別の被曝線量の関数であることが判明した。ガンマ線の二乗に依存し、中性子線は線形に依存するモデルが資料を解釈する上で最も適切であった。ガンマ線量の二乗についての回帰係数は -0.00000927 、中性子線量の係数は -0.0172 であった。身長の発育阻害効果

biological effectiveness of neutrons in relation to gamma radiation with respect to the effect for diminished development of stature is estimated as $43.1 / \sqrt{Dn}$ in kerma (Dn =neutron dose). The 95% confidence limits are $19.3 / \sqrt{Dn} \sim 96.5 / \sqrt{Dn}$.

INTRODUCTION

Belsky and Blot¹ have reported that average height is significantly shorter among Hiroshima survivors aged less than 6 ATB and who received 100 rad or more, but not among Nagasaki survivors. They stated that the city difference is explicable, at least in part, on the basis of the difference in radiation quality in Hiroshima and Nagasaki. However, they did not examine the effect of radiation on stature as a separate function of gamma and neutron dose. Since improved estimates of exposure have recently become available in Nagasaki based on a new epicenter proposed by Kerr and Solomon,² it seems timely and worthwhile to examine the stature of individuals in the AHS³ sample in relation to gamma and neutron doses, separately.

MATERIALS AND METHODS

Height and body weight have been recorded for the individuals who received AHS biennial health examination since 1958. The study subjects in the present analysis were selected from the A-bomb survivors aged less than 10 ATB in the AHS sample and whose height and weight were recorded during the 7th Cycle (1970-72) of biennial health examinations. Since individual age at the examination ranged from 25 to 36, it was considered that their statural growth had been completed. There were 654 such individuals in the sample.

Individual dose estimates have recently been calculated anew using the revised Nagasaki epicenter proposed by Kerr and Solomon² and a standardized rounding procedure. If the kerma total dose for a survivor was calculated to be 600 rad or more, in Hiroshima the gamma dose for that individual was arbitrarily set at 439 rad and the neutron dose at 161 rad, and in Nagasaki they were set at gamma 587 rad and neutron 13 rad, to minimize the possible effects of erroneous estimates. There were 8 subjects with this adjustment in Hiroshima and 6 in Nagasaki. Estimated dose has not been calculated for 26 individuals due either to inadequate information

に関するガンマ線に対する中性子線の相対的生物学的効果比は、カーマ線量で $43.1 / \sqrt{Dn}$ (Dn = 中性子線量), 95%信頼区間 $19.3 / \sqrt{Dn} \sim 96.5 / \sqrt{Dn}$ であった。

緒言

Belsky 及び Blot¹ は、原爆時 6 歳未満で 100 rad 以上の線量を受けた被爆者の身長は、広島では有意に低かったが、長崎ではそうでなかったことを報告した。彼らは、この差は両市の放射線の線質の差によって少なくとも部分的には説明できるであろうと述べているが、身長に及ぼす放射線の影響をガンマ線量及び中性子線量別の関数としては調べていない。長崎では、Kerr 及び Solomon² が提案した新しい爆央を用いて最近改訂した被曝線量の推定値が得られたので、成人健康調査集団³ 対象者の身長と、ガンマ線及び中性子線別にみた線量との関係を検討することは、時宜にかなった意義あるものと思われる。

材料及び方法

1958 年以来 2 年ごとに成人健康調査の検診を受けた対象者は、身長と体重が記録されている。今回の解析の対象者には、成人健康調査集団のうち原爆時年齢が 10 歳未満で第 7 診察周期 (1970-72 年) に身長と体重が記録されている被爆者を選んだ。これら対象者の検診時年齢は 25-36 歳の範囲であったので、その身長の伸びは完了していたと考えられる。同集団の該当者は 654 名であった。

各対象者の線量推定値は、Kerr 及び Solomon² が提案した長崎の改訂した爆央及び標準化した数値の丸め法を用い、最近新たに再計算が行われた。被爆者のカーマ総線量が 600 rad 以上と計算された場合は、推定値の誤差の影響を最小限にするため、任意に広島ではその対象者のガンマ線量を 439 rad、中性子線量を 161 rad とし、長崎ではガンマ線量を 587 rad、中性子線量を 13 rad とした。この補正を行った者は広島では 8 名、長崎では 6 名であった。26 名については遮蔽資料が不十分であるか、その被曝状態が複雑で

on their shielding or its complex nature. These 26 persons with unknown dose were excluded from the analysis. Thus, the present analysis deals with 358 individuals in Hiroshima and 270 in Nagasaki.

In the statistical analysis, to ascertain the relationship of stature to radiation exposure differences of average height were examined in relation to kerma total dose, city, sex, and age ATB. To ascertain the relationship of stature to kerma gamma and neutron doses three dose-response models were used:

Model I. Linear dependence on both gamma and neutron doses;

Model II. Squared gamma dose dependence and linear dependence on neutrons; and

Model III. Linear and squared gamma dose dependence and linear dependence on neutrons.

The present analysis treats stature as a continuous phenomenon using a stepwise regression analysis.⁴ The following three formulas for dose-response models were applied to the data to determine their fitness.

$$\text{Model I: } Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 D\gamma + b_5 Dn$$

$$\text{Model II: } Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 D\gamma^2 + b_5 Dn$$

$$\text{Model III: } Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 D\gamma + b_5 D\gamma^2 + b_6 Dn$$

where Y = stature (cm), a = constant, X_1 = city, X_2 = sex, X_3 = age ATB, $D\gamma$ = gamma dose, $D\gamma^2$ = squared gamma dose, and Dn = neutron dose.

RESULTS

Mean and Standard Deviation of Height by City, Sex, and Total Dose

Table 1 gives the mean and standard deviation of height in A-bomb survivors aged less than 10 ATB in the AHS sample by city, sex, and dose. It also shows the results of homogeneity tests of variance⁵ for four dose groups by city and sex. Average height tends to be lower as exposure increases, except among Nagasaki males. Variance of height does not differ significantly by dose.

あるかのいずれかによって、推定線量の計算が行われていない。線量が不明であるこれら26名は解析の対象から除外した。したがって今回の解析では広島358名、長崎270名を対象とした。

統計的解析では、身長と放射線被曝との関係を明らかにするためカーマ総線量別、都市別、性別及び原爆時年齢別にみた平均身長の変異を調べた。また、身長とカーマ線量によるガンマ線及び中性子線との関係を確認するため、次の三つの線量反応モデルを用いた。

モデルⅠ. ガンマ線量と中性子線量ともに線形に依存する。

モデルⅡ. ガンマ線量の二乗に依存し、中性子線量では線形に依存する。

モデルⅢ. ガンマ線量の線形及び二乗に依存し、中性子では線形に依存する。

今回の解析では身長を一つの連続的現象として扱い、段階的回帰解析⁴を用いた。線量反応モデルを調べるために、次の三つの公式を資料に適用しその適合性を決定した。

ただし、 Y = 身長 (cm), a = 定数, X_1 = 都市, X_2 = 性, X_3 = 原爆時年齢, $D\gamma$ = ガンマ線量, $D\gamma^2$ = ガンマ線量の二乗, Dn = 中性子線量である。

結 果

身長の前平均値及び標準偏差；都市別、性別及び総線量別

表1は成人健康調査対象者で、原爆時10歳未満であった被爆者の身長の前平均値と標準偏差を都市別、性別及び線量別に示した。また、四つの線量群における身長の分散の均一性の検定⁵の結果も都市別及び性別に示した。長崎の男子を除けば、身長の前平均値は被曝線量の増加とともに低下する傾向が認められた。身長の分散は線量別に有意な差は認められなかった。

TABLE 1 MEAN AND STANDARD DEVIATION OF HEIGHT OF AHS SUBJECTS
AGED LESS THAN 10 ATB BY CITY, SEX, AND KERMA DOSE

表1 原爆時10歳未満であった成人健康調査対象者の身長の平均値及び
標準偏差; 都市別, 性別, コーマ線量別

Dose Range	Kerma Dose in rad		Male			Female		
	Mean		Subjects	Mean Height	S.D.	Subjects	Mean Height	S.D.
	D _γ	D _n						
Hiroshima								
300-600	340.9	120.4	20	161.0	5.18	20	149.9	6.90
100-299	150.7	43.2	20	164.4	5.55	25	151.1	5.34
1- 99	23.3	5.9	56	166.4	6.18	91	153.6	5.84
< 1	0.0	0.0	52	164.9	6.02	74	153.0	5.54
Total	-	-	148	164.9	6.11	210	152.7	5.87
Nagasaki								
300-600	446.0	8.1	18	164.3	6.64	19	149.8	5.33
100-299	188.7	2.7	31	165.1	5.04	32	151.5	5.26
1- 99	38.2	0.2	31	164.4	5.43	38	152.1	4.25
< 1	0.0	0.0	48	163.3	5.72	53	152.8	4.81
Total	-	-	128	164.1	5.61	142	151.9	4.89

Homogeneity test of variance for four dose groups: 四つの線量群における分散の均一性の検定

Hiroshima Male $\chi^2=1.04$, $df=3$, $P>.05$ Female $\chi^2=2.00$, $df=3$, $P>.05$

Nagasaki Male $\chi^2=1.90$, $df=3$, $P>.05$ Female $\chi^2=2.00$, $df=3$, $P>.05$

TABLE 2 TWO-WAY ANALYSIS OF VARIANCE OF HEIGHT IN AHS SUBJECTS
AGED LESS THAN 10 ATB IN RELATION TO DOSE AND SEX BY CITY

表2 都市別にみた原爆時10歳未満であった成人健康調査対象者の身長に
ついでる線量及び性の二元分散分析

Class	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Test	Probability
Hiroshima					
Sex	13264	1	13264	388.78	P < .01 **
Dose	698.1	3	232.7	6.82	P < .01 **
Interaction	39.35	3	13.12	0.38	P > .05 NS
Between	13620	7	1945.7	57.03	P < .01 **
Within	11941	350			
Total	25561	357			
Nagasaki					
Sex	10063	1	10063	367.51	P < .01 **
Dose	47.18	3	15.73	0.57	P > .05 NS
Interaction	150.89	3	50.30	1.84	P > .05 NS
Between	10295	7	1465.6	53.52	P < .01 **
Within	7174.4	262	27.38		
Total	17469	269			

Dose < 1, 1-99, 100-299, 300-600 rad

TABLE 3 TWO-WAY ANALYSIS OF VARIANCE OF HEIGHT IN AHS SUBJECTS
AGED LESS THAN 10 ATB IN RELATION TO DOSE AND AGE ATB BY CITY AND SEX

表3 都市別、性別にみた原爆時10歳未満であった成人健康調査対象者の身長に
ついての線量及び原爆時年齢の二元分散分析

Sex	Class	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Test	Probability
Hiroshima						
Male	Age ATB	17.82	1	17.82	0.50	P > .05 NS
	Dose	459.22	3	153.07	4.28	P < .01 **
	Interaction	21.02	3	7.01	0.20	P > .05 NS
	Between	482.05	7	68.86	1.93	P > .05 NS
	Within	5006.6	140	35.76		
	Total	5488.7	147			
Female	Age ATB	3.99	1	3.99	0.12	P > .05 NS
	Dose	296.26	3	98.75	2.91	P > .05 NS
	Interaction	40.15	3	13.38	0.40	P > .05 NS
	Between	338.41	7	48.34	1.43	P > .05 NS
	Within	6851.6	202	33.92		
	Total	7190.0	209			
Nagasaki						
Male	Age ATB	0.08	1	0.08	0.00	P > .05 NS
	Dose	65.19	3	21.73	0.69	P > .05 NS
	Interaction	152.84	3	50.95	1.62	P > .05 NS
	Between	218.61	7	31.23	0.99	P > .05 NS
	Within	3780.9	120	31.51		
	Total	3999.5	127			
Female	Age ATB	23.16	1	23.16	0.97	P > .05 NS
	Dose	132.80	3	44.27	1.86	P > .05 NS
	Interaction	21.70	3	7.23	0.30	P > .05 NS
	Between	177.24	7	25.32	1.06	P > .05 NS
	Within	2195.7	134	23.85		
	Total	2373.0	141			

Age ATB 0-4, 5-9

Dose < 1, 1-99, 100-299, 300-600 rad

Table 2 reveals the results of a two-way analysis of variance of height in relation to sex and dose by city. Height is significantly different by sex and kerma total dose in Hiroshima, whereas in Nagasaki, it is significantly different by sex, but not by kerma total dose.

Table 3 shows the results of a two-way analysis of variance of height in relation to age ATB and dose by city and sex. Height is significantly different by dose, but not by age ATB in Hiroshima males, whereas it is not different by age ATB or dose in Hiroshima females and in Nagasaki subjects. Therefore, the analysis

表2は、都市別に身長について、性と線量との二元分散分析の結果を示した。広島では身長は性とカーマ総線量で有意な差があるが、長崎では性別のみに有意な差があり、カーマ総線量別には差が認められなかった。

表3は都市別、性別に身長について原爆時年齢と線量との二元分散分析の結果を示した。広島の男子の身長は線量で有意な差が認められたが、原爆時年齢では差が認められなかった。広島の女子と長崎の対象者では、身長は原爆時年齢と線量による有意な差は認められなかった。したがって解析からは、

TABLE 4 STEPWISE REGRESSION ANALYSIS OF HEIGHT AMONG A-BOMB SURVIVORS AGED LESS THAN 10 ATB IN RELATION TO CITY, SEX, AGE ATB, GAMMA DOSE, AND NEUTRON DOSE BY THREE MODELS (628 SUBJECTS)

表4 原爆時10歳未満であった被爆者の身長と都市、性、原爆時年齢、ガンマ線量及び中性子線量との関係に関する段階的回帰解析；三つのモデル別（対象者628名）

Variables in Equation	Regression Coefficient	Standard Error	Partial F-Test	P
Model I $Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 D\gamma + b_5 Dn$				
Age ATB (X_3)	-0.1418	0.0840	2.85	P > .05 NS
Gamma dose ($D\gamma$)	-0.0068	0.0016	17.30	P < .01 **
Sex (X_2)	12.2217	0.4502	737.06	P < .01 **
Constant (a)	153.6			
Percentage of variation explained (R^2) = 54.6%				
Variables not in regression: Neutron dose (Dn) and city (X_1)				
Model II $Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 D\gamma^2 + b_5 Dn$				
Age ATB (X_3)	-0.1313	0.08448	2.42	P > .05 NS
Neutron dose (Dn)	-0.0172	0.00834	4.25	P < .05 *
City (X_1)	0.8570	0.50631	2.86	P > .05 NS
Sex (X_2)	12.2286	0.45014	737.99	P < .01 **
Squared gamma dose ($D\gamma^2$)	-0.00000927	0.00000425	4.75	P < .05 *
Constant (a)	152.9			
Percentage of variation explained (R^2) = 54.8%				
Covariance $\hat{D}\gamma \hat{D}n = -0.18247 \times 10^{-7}$				
RBE = $43.1 / \sqrt{Dn}$ (95% confidence limits : $19.3 / \sqrt{Dn} \sim 96.5 / \sqrt{Dn}$)				
Model III $Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 D\gamma + b_5 D\gamma^2 + b_6 Dn$				
Age ATB (X_3)	-0.1418	0.0840	2.85	P > .05 NS
Gamma dose ($D\gamma$)	-0.0068	0.0016	17.30	P < .01 **
Sex (X_2)	12.2217	0.4502	737.06	P < .01 **
Constant (a)	153.6			
Percentage of variation explained (R^2) = 54.6%				
Variables not in regression: Neutron dose (Dn), city (X_1), and squared gamma dose ($D\gamma^2$)				

Note: Criteria for in and out: 2.0

Y = height (cm), X_1 = city, X_2 = sex, X_3 = age ATB, $D\gamma$ = gamma dose, Dn = neutron dose, $D\gamma^2$ = squared gamma dose (rad)

suggests that any radiation insult before the adolescent growth spurt has not a specific effect in Hiroshima males for disturbance of statural development.

Relationship of Stature as Continuous Variables to Gamma and Neutron Exposure

Table 4 summarizes a stepwise regression analysis of the relationship of height to gamma and neutron doses in conjunction with concomitant factors such as city, sex, and age ATB for three dose-response models. The first model assumes a linear dependence of stature on both gamma and neutron doses (Model I); the second

身長が発育阻害については、思春期の身長急成長前に放射線被曝した場合は、広島男子でも特別な影響はないことが示唆される。

連続変数としての身長とガンマ線及び中性子線被曝との関係

表4には三つの線量反応モデルについて、ガンマ線量及び中性子線量とそれに伴う都市、性及び原爆時年齢などの因子と身長との関係について段階的回帰解析を行った結果を要約した。第1のモデルは、身長がガンマ線量及び中性子線量に対して線形に依存して

assumes a squared term dependence on gamma rays and a linear dependence on neutrons (Model II); and the third assumes a linear and squared term dependence on gamma rays and a linear dependence on neutrons (Model III). According to Model I, height varies significantly with sex and gamma dose, but is not significantly related to neutron dose, city, nor age ATB. According to Model II, height changes significantly with sex, squared gamma dose, and neutron dose, but is not related to city nor age ATB. According to Model III, height depends significantly upon sex and gamma dose, but is not significantly related to city, squared gamma dose, nor neutron dose. Thus, it appears that if height is related to both gamma and neutron doses, Model II provides a better explanation of the data. The regression coefficient associated with the squared gamma dose is -0.0000927 and the coefficient associated with neutron dose is -0.0172 . The RBE of neutrons in relation to gamma radiation with respect to the effect for diminished development of stature is calculated as $43.1 / \sqrt{Dn}$ (95% confidence limits: $19.3 / \sqrt{Dn} \sim 96.5 / \sqrt{Dn}$) in kerma under Model II. The similarity in the percentages of variation explained (R^2) under the three models is somewhat surprising, and suggests that dose itself contributes little to variation in height.

DISCUSSION

Studies of growth and development among A-bomb survivors have shown the average attained height of the survivors who received 100 rad or more during childhood to be significantly shorter than control subjects in Hiroshima.¹ The effect is different between the two cities. The report ascribes this difference at least in part to the different quality of radiation in the two cities. Children in the Marshall Islands exposed to fallout radiation in 1954 were also noted to have a significant reduction in height.^{6,7} These two observations suggest that exposure to radiation in childhood produces a disturbance in growth and development of stature.

The present analysis is restricted, of course, to measurements of height on individuals alive in 1970-72 (25 years after exposure). We assume that attrition in the study subjects did not vary by dose, development of stature, or mortality. It is also clear that growth and development of stature depends upon nutrition, socioeconomic conditions, and possibly other factors. We must

いると仮定した(モデルI)。次はガンマ線量の二乗に依存し、中性子線量に対し線形に依存していると仮定した(モデルII)。第3のモデルは、ガンマ線量に対しては線形と二乗に依存し、中性子線量には線形に依存するとそれぞれ仮定した(モデルIII)。モデルIによれば、身長は性及びガンマ線量と有意な関係が認められる。中性子線量、都市、あるいは原爆時年齢との間に有意な関係はない。モデルIIでは、身長は性、ガンマ線量の二乗及び中性子線量とともに有意な関係が認められたが、都市又は原爆時年齢との関係は有意でない。モデルIIIによれば、身長は性及びガンマ線量と有意な関係が認められたが、都市、ガンマ線量の二乗又は中性子線量では有意な関係は認められなかった。したがって、身長がガンマ線量及び中性子線量の双方と関係があるのであれば、モデルIIによれば資料に対してよりよい説明が得られる。ガンマ線量の二乗についての回帰係数は -0.0000927 であり、中性子線量についての係数は -0.0172 である。モデルIIでは、身長の発育阻害効果についてガンマ線に対する中性子線のRBEの値は、カーマ線量で $43.1 / \sqrt{Dn}$ (95%信頼限界: $19.3 / \sqrt{Dn} \sim 96.5 / \sqrt{Dn}$)として表された。三つのモデルで述べた(R^2)の百分率が近似していることは、幾らか驚きに値するが、これは線量が身長の変動に対し統計的にあまり大きな寄与をしていないことを示唆する。

考 察

原爆被爆者の成長及び発育に関する調査では、広島では小児期に100 rad以上を受けた被爆者の成人期の平均身長が対照者のそれよりも有意に低いことが報告されている。¹ その影響は都市別に見て差がある。本報告は、この差の少なくとも一部は両市間の放射線の線質の差によるものと考えた。1954年に放射線降下物に被曝したMarshall群島の子供らは、身長の成長が有意に阻害されていることが認められた。^{6,7} これら二つの観察から、小児期に放射線に被曝すると身長の発育が阻害されることが示唆される。

本解析は、1970-72年(すなわち被曝25年後)に生存していた者の身長測定値に限定した。調査対象者数の受診率の減少は、線量、身長の発育又は死亡率によって差異はなかったものと仮定した。身長の発育は、栄養、社会経済的条件、あるいはその他の因子によっても左右されることは明らかである。また、この

also assume that such concomitant factors affected equally all young survivors in Hiroshima and Nagasaki regardless of dose. We also assume that the diminution in attained stature of those individuals aged less than 10 ATB depends upon the quality and quantity of radiation they received. Three simple dose-response models were selected from among those commonly proposed to examine the dose effect for diminished stature to gamma and neutron dose. However, any dose-response model is conjectural. The present analysis was performed for stature as a continuous variable in relation to gamma and neutron doses. The analysis clearly demonstrates that the height of survivors aged less than 10 ATB decreases as a function of the squared gamma dose and neutron dose under Model II if both kinds of radiation are related to height. The estimated RBE is around $43 / \sqrt{Dn}$ and is similar to the RBE values seen for certain other late biological effects among A-bomb survivors⁸⁻¹¹ and in animal experiences by Rossi.¹²

The mechanism of the effect is not clear, but it probably involves a dysfunction of certain hormonal organs related to growth and development. Sutow et al⁶ and Robbins et al⁷ reported that the short stature in Marshall Islands children exposed to fallout radiation was probably due to radiation-induced thyroid dysfunction.

Contrary to the previous report,¹ the present analysis suggests that dose effect for diminished stature is not significantly related to age ATB for individuals exposed before the adolescent growth spurt, which was probably caused by the small sample size. A similar analysis was also conducted for body weight, however, there was no statistically significant relationship between body weight and either gamma or neutron doses.

ような随伴因子は広島・長崎両市の若年被爆者の全員に、線量のいかんにかかわらず影響を与えたものと考えられる。更に、原爆時10歳未満であった者の成人期身長への阻害も、受けた放射線の線質及び線量に影響されたと推定した。ガンマ線量及び中性子線量による身長への阻害という線量の影響を調べるのに一般に用いられているモデルから、三つの簡単な線量反応モデルを選んだが、いずれの線量反応モデルも推論である。今回は、連続変数としての身長とガンマ線量及び中性子線量との関係について解析した。本解析によれば、モデルIIでは、両種の放射線が身長と関係がある場合は、原爆時10歳未満であった被爆者の身長は、ガンマ線量の二乗及び中性子線量の関数として低下することが明らかに認められる。推定したRBEは約 $43 / \sqrt{Dn}$ で、これは、被爆者⁸⁻¹¹及びRossi¹²が動物実験によって得た他の特定の生物学的後影響のRBE値と類似している。

この影響の機序は明らかでないが、恐らく成長及び発育と関係のある特定のホルモン系臓器の機能障害によると思われる。Sutowら⁶及びRobbinsら⁷は、放射性降下物に被曝したMarshall群島民の子供の身長への低下は、恐らく放射線誘発性の甲状腺機能障害によるものであろうと報告した。

以前の報告¹に対して、本解析では身長への阻害に対する放射線の影響は、思春期の急成長期以前に被曝した者の原爆時年齢とは有意な関係がないことが示唆されたが、これは恐らく対象集団の規模が小さいことによるものかもしれない。体重についても同様の解析を行ったが、体重とガンマ線又は中性子線の線量との間には統計的に有意な関係は認められなかった。

REFERENCES

参考文献

1. BELSKY JL, BLOT WJ: Adults stature in relation to childhood exposure to the atomic bombs of Hiroshima and Nagasaki. *Am J Public Health* 65:489-94, 1975 (ABCC TR 35-71)
2. KERR GD, SOLOMON DL: The epicenter of the Nagasaki weapon: A reanalysis of available data with recommended values. Oak Ridge National Laboratory, 1976. ORNL-TM-5139
3. ABCC-JNIH: ABCC-JNIH Adult Health Study, Hiroshima-Nagasaki, Research Plan. ABCC TR 11-62
4. DRAPER NR, SMITH H: Applied regression analysis, selecting the "Best Regression Equation". New York, London, Sydney, John Wiley & Sons Inc., 1966. pp 163-216
5. HALD A: Statistical theory with engineering applications. A test for the equality of k theoretical variance. New York, London, John Wiley & Sons Inc., 1952. pp 290-9
6. SUTOW WW, CONARD RA, GRIFFITH KM: Growth status of children exposed to fallout radiation on the Marshall Islands. *Pediatrics* 36:721-31, 1965
7. ROBBINS J, RALL JE, CONARD RA: Late effects of radioactive iodine in fallout. *Ann Intern Med* 66: 1214-42, 1967
8. ISHIMARU T, OTAKE M, ICHIMARU M: Dose-response relationship of neutrons and γ rays to leukemia incidence among atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki by type of leukemia, 1950-1971. *Radiat Res* 77:377-94, 1979 (RERF TR 14-77)
9. OTAKE M: Dose-response relationship of neutron and gamma rays to chromosomally aberrant cells among atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki. *J Radiat Res* 20:307-21, 1979 (RERF TR 19-78)
10. OTAKE M, SCHULL WJ: Relationship of gamma and neutron radiation to posterior lenticular opacities among atomic bomb survivors, Hiroshima and Nagasaki. RERF TR 17-81
11. ISHIMARU T: Dose-response relationship of breast cancer incidence to gamma and neutron exposure among atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki, 1950-74, RERF TR in preparation
12. ROSSI HH: The effects of small doses of ionizing radiation. *Phys Med Biol* 15:255-62, 1970