2010年1月30日 今中哲二

リトルボーイ ノート その0

『広島原爆リトルボーイでの核分裂反応のときに ²³⁵U(n, γ)反応で生成した ²³⁶Uを測定したら、 "黒い雨"地域でのリトルボーイ放射能の痕跡を確認できるかも』ということで、広島大の坂口さん に AMS で、放医研のサフーさんに TIMS で広島市周辺の土壌中 ²³⁶U を測定してもらっている。

リトルボーイでの ²³⁶U 生成量については、²³⁵U の核分裂量(57g/kton×16kton=912g)と、核分 裂中性子に対する[捕獲/核分裂]断面積の比(91.36 mbarn/1.238 barn=0.0738、JENDL-3.3) を使って、912×0.0738=67.3g と見積もってきた。この計算で、「核分裂スペクトルの仮定」がどの 程度成立するものか気になっていたので、それなりに合理的なモデルを基にリトルボーイ中での中性 子スペクトルを計算しておきたいと思っていた。

一方、黒い雨についての気象シミュレーションの話が気象研の青山さんらによって進められている。 気象シミュレーションでは、『こんなキノコ雲がありました』というところから始まることになるだ ろうから、『核分裂からキノコ雲』までの話をつないでおく必要があるように思っている。

そこで一念発起して、リトルボーイの爆発プロセスからはじまるいろいろな問題を、シリーズとして「リトルボーイノート」にまとめてみることにした。具体的なテーマとしては

◆ ノートその1:構造

◆ ノートその2:臨界量と臨界終了時のふくれ方

- ◆ ノートその3:核分裂の時間スケール
- ◆ ノートその4:コア温度

◆ ノートその5:コアの圧力と膨張速度発生

までをとりあえずまとめてみた。今後は、

- ◆ ファイアボールの生成と成長
- ◆ Prompt ガンマ線によるガンマヒーティング
- ◆ 大気中衝撃波の発生と伝播
- ◆ ファイアボール中心位置の上昇
- ◆ ファイアボール表面温度と熱線放射
- ◆ 核分裂生成物の組成変化
- ◆ コア内での中性子スペクトル計算
- ◆ 236U などアクチノイド生成量計算

などなどを考えている。 ということで『乞うご期待』





上:エノラゲイの尾部銃座から 左:約1時間後に偵察機から(四国上空か)

リトルボーイ ノート その1:構造 (Version 1)

広島・長崎原爆の構造・組成は、"ホンモノ"は、今でも非公開であるが、さまざまな"想定図" が出回っている。その中で、"もっとも詳しくて確かそう"なのが下の図である。



Cross-section drawing of Y-1852 Little Boy showing major mechanical component placement. Not shown are the APS-13 radar units, clock box with pullout wires, baro switches and tubing, batteries, and electrical wiring. Numbers in () indicate quantity of identical components. Drawing is shown to scale. (Author)

- A) Front nose elastic locknut attached to 1.0" diameter cadmium-plated draw bolt
- 15.125" diameter forged steel nose nut B)
- 28.0" diameter forged steel target case C)
- D) Impact absorbing anvil with shim
- WC tamper insert base E)
- Polonium-Beryllium initiators (4) F)
- 15" diameter K-46 steel WC tamper liner sleeve G)
- 4.0" diameter U-235 target insert discs (6) H)
- 13" diameter 3-piece WC tamper liner assembly I)
- Yagi antenna assembly (4) J)
- Target-case to gun-tube adapter K)
- Lift lug L)
- Safing/arming plugs (3) M) N)
- 6.5" bore gun tube
- 28" diameter bulkhead plate 0) Electrical plugs (3)
- P) Q) Baro ports (8)
- 0.75" diameter armored tube containing primer wiring (3) R)
- 1.0" diameter rear alignment rod (3) S)
- 6.25" diameter U-235 projectile rings (9) T)
- Tail tube forward plate U
- Projectile WC filler plug V)
- W) Projectile steel back
- 2-pound WM slotted-tube Cordite powder bags (4) X)
- Gun breech with removable inner breech plug and stationary outer bushing Y)
- Mark 15 Mod 1 electric gun primers (3) Z)
- AA) Tail tube aft plate
- BB) 2.25" long 5/8-18 socket-head tail tube bolts (4)
- CC) 15" diameter armored inner tail tube
- DD) Inner armor plate bolted to 15" diameter armored tube
- EE) Rear plate (w/smoke puff tubes) bolted to 17" diameter tail tube

H がターゲット側ウラン(円柱ディスク外径 10.16cm、25.62kg)で、T が射出側ウラン(円筒リン グ外径 15.9cm、38.53kg) である。X が火薬で、T は、V (WC でできたプラグ)、W (バックスチー ル)と一体で"発射"されてターゲットウランと合体する。E、I(外径 33.0 cm)、V が炭化タング ステン(比重 15.6)のタンパーで、頭部全体は外径 71.1cmの円柱形スチールに埋め込みになってい る。

装荷ウラン量は 64.15kg になるが、その濃縮度は、電磁分離器(Caltoron)の性能が安定せず、均 一ではなかった。本メモでは、英文 Wikipedia を参考に、濃縮度 89%が 50kg、50%が 14kg で『平 均80%』としておく。

出典: Coster-Mullen J (2008) ATOM BOMBS: The top secret inside story of Little Boy and Fat man.

2010年1月30日 今中哲二

リトルボーイ ノート その2:臨界量と臨界終了時のふくれ方(Version 1)

リトルボーイ(以下LB)に装荷されていたウラン量は64.15kgであったとする。その体積は3.43 リットル(密度18.7g/cm³)となり、球にすると半径は9.36cmでバレーボール程度である。(Fatman の場合は、プルトニウム6.2kg 半径4.2cmで、テニスボールよりちょっと大きい。)

ここで見積もりたいのは、ウラン球が膨れ反応度が低下して超臨界から臨界ちょうどに戻ったとき のウランの大きさ(膨脹の程度)である。つまり、この時の核分裂がもっとも盛んなはずなのでその 大きさの形状モデルで、MCNP モンテカルロコードを使って中性子スペクトルを計算してみようという 魂胆である。

まずは、40年前に使った炉物理の教科書(Glasstone & Edlund、伏見康治・大塚益比古訳「原子炉の理論」1952)をひっぱり出してきて、『一群エネルギー・球形近似』の解析的手法でウラン臨界量を計算してみた。裸の場合の臨界量や、タングステンや炭化タングステン反射体付きの場合の臨界量を計算して、文献値・実験値と比較してみると案外とうまく行った。その計算手法を応用して、LB 臨界終了時の半径を求めると 10.8cm という値が得られた。

1. 裸のウラン球での臨界量

真空中に置かれている、裸の球形ウラン塊の臨界量を考える。中性子エネルギーは核分裂生成エネ ルギー1群(約2MeV)とする。G&E 教科書の(5-35-1)式にならって、中性子の挙動を1群の拡散方程 式で表すと

$$D\Delta\phi(r) + (\eta - 1)\Sigma_a\phi(r) = \frac{\partial n(r)}{\partial t} \qquad (1)$$

ここで、D:中性子束に対する拡散定数 [LT⁻¹]、 ϕ :中性子束 [L⁻²T⁻¹]、 Σ a:マクロ吸収断面積[L⁻¹]、 η :吸収中性子当りの中性子発生数、n:中性子密度 [L⁻³]。

①式左辺の第1項は『中性子束の"沸きだし"』で、第2項は『中性子の発生』である。 定常状態(つまり臨界ちょうど)では、右辺の時間変化はゼロなので、

 $D\Delta\phi + (\eta - 1)\Sigma_a\phi = 0 \qquad (2)$ となる。ここで、

$$B^2 = \frac{(\eta - 1)\Sigma_a}{D} \qquad (3)$$

とおくと、

 $\Delta\phi(r) + B^2\phi(r) = 0 \qquad (4)$

が得られる。④式は、俗に"波動方程式"と呼ばれるもので、球座標系で φ (r)の解を求めると (G&E 本 p179)、

 $\phi(r) = A \frac{\sin Br}{r}$ (A は定数) ⑤

さらに、境界条件、『ウラン球表面での ϕ (r)値は、そこの勾配で 0.71× λ_t の距離ほど外挿したら ϕ (r)=0となる』という輸送理論の知見(G&E本 p167)を用いる。 λ_t (=3D)は中性子輸送の平均自 由行程で、

 $R_L = R_C + 0.71 \cdot \lambda_t \qquad \text{(6)}$

$$\geq \cup \tau \quad \phi(R_L) = A \frac{\sin BR_L}{R_L} = 0 \qquad (7)$$

が得られる。⑦式が成立するためには、 $BR_L = a\pi$ (aは任意の整数) となり、 $B^2 = \left(\frac{a\pi}{R_L}\right)^2$ が④式

の固有値となる。そして a=1 として、

$$R_L = \frac{\pi}{B} \qquad (8)$$

となり、③と⑥を代入・整理すると

$$R_{C} = \pi \left(\frac{D}{(\eta - 1)\Sigma_{a}}\right)^{1/2} - 0.71 \cdot \lambda_{t} \qquad (9)$$

中性子の輸送理論近似より、

$$D = \frac{1}{3\Sigma_t (1 - 4\Sigma_a / 5\Sigma_t)} \qquad \qquad \text{(1)}$$

なので、ウランに対する必要な特性値が分かれば、⑨式より臨界半径 Rcを計算することができる。 表1に235U、238Uの主な特性値、表2に裸の場合の臨界半径と重量をしめす。

表1. 核分裂生成中性子に対するUとPuの中性子反応断面積(barn、JENDL3.3)とv値

	σ t	σs	σ a	σf	σ cap	ν
²³⁵ U	7.71	6.36	1.34	1.238	1.34	2.6055
²³⁸ U	7.79	7.39	0.391	0.3085	0.391	2.601
²³⁹ Pu	7.71	5.85	1.86	1.801	0.053	3.01

表2. 臨界半径と臨界質量の計算結果

	Density	Σ t	Σa	$\Sigma_{ m f}$	λ_{t}	λ t	(今中計算値)		(文献値)
	$g cm^{-3}$	cm^{-1}	cm^{-1}	cm^{-1}	1]	cm	$R_{\rm c}$ cm	Mc,kg	Mc,kg
²³⁵ U 100%	18.7	0.364	0.063	0.059	2.41	3.19	8.58	49.4	—
²³⁵ U 93.7%	18.7	0.365	0.061	0.056	2.38	3.16	8.89	55.0	52.25
²³⁵ U 80 %	18.7	0.365	0.054	0.050	2.34	3.11	9.65	70.4	68
²³⁹ Pu	19.8	0.385	0.093	0.090	2.92	3.22	5.43	13.3	10.5

表2の右端が計算結果で、文献値とまずまず一致している。LBの濃縮度80%の臨界量は約70kgなので、反射体がなければLBのウランは臨界に至らない。

1. 反射体がある場合の臨界量

半径 Rcmの中心ウランのまわりに厚さ Tcmの反射体がある場合の臨界量を考える。 中心部の中性子束に対しては、④式と同様に(G&E 本 p200)、

$$\Delta\phi_c(r) + B_c^2\phi(r) = 0 \quad , \quad \Delta\phi_r(r) - k_r^2\phi(r) = 0 \quad (1)$$

添字の c と r は、中心部 (core) と反射体 (reflector) を示し、

$$B_c^2 = \frac{(\eta - 1)\Sigma_{ac}}{D_c}, \quad k_r^2 = \frac{\Sigma_{ar}}{D_{cr}} \, \tilde{c} \, \tilde{b} \, \tilde{c}_o$$

⑪式を解くと、 $\phi_c(r) = A \frac{\sin B_c r}{r}, \quad \phi_r(r) = A' \frac{\sinh k_r (R+T-r)}{r}$ ⑫

が得られる。⑫式に対し、中心部と反射体の『境界面での中性子束の連続』、『反射体表面から外挿距 離での φr=0』という境界条件を与えると、RとTの関係式が得られる。

$$\cot B_c R = \frac{1}{B R} \left(1 - \frac{D_r}{D_c} \right) - \frac{D_r}{D_c B_c L_r} \coth \frac{T}{L_r} \qquad \text{(3)} \qquad (\text{ttill} Lr = 1/\text{kr})$$

③式を使って、T(反射体厚さ)が与えられたときの臨界量(R)を計算できる。
 93.5%濃縮のウラン球にWやWCの反射体をつけたときの臨界量文献値があったので、計算して比較してみた。

	タン	グステン(W)反射体	炭化タ	炭化タングステン(WC)反射体			
反射体厚	(今中言	計算値)	(文献値)	(今中	(今中計算値)			
	Rc, cm	Mc, kg	Mc, kg	Rc, cm	Mc, kg	Mc, kg		
なし	8.89	55.0	_					
2.54 cm	7.42	32.0	31.2	7.24	29.7	—		
5.08 cm	6.78	24.4	24.1	6.52	21.7	21.3		
10.16 cm	6.36	20.1	19.4	6.00	16.9	16.5		
12 cm				5.92	16.2	—		
20 cm				5.77	15.0	_		

表3. 反射体付きウラン(濃縮度93.7%)の臨界量

表3から、反射体付きの場合でも、ほどほどに計算できていると考えてよい。WやWC反射体の場合、 厚さが10cmを越えると反射体効果は落ちるようだ。

最後に、濃縮度 80%で超臨界のリトルボーイ球形コアが膨れながら『臨界ちょうど』になったときの半径を、反射体 12cm の反射体付きで計算してみると、10.8cm となった。元の半径は 9.34cm なので、 『わずかに約 1.5cm ふくれたところで臨界終了』ということになる。

ついでに、コア半径 9.34cm、WC 反射体 12cm という形状で臨界となるウランの η 値を決めると 1.72 となった。つまりこの形状では、系から外部へ漏洩しない中性子の割合は 1/1.72=0.58 である。濃縮度 80%のウランの η 値は 2.34 なので、『リトルボーイの実効増倍係数は 1.36 であった』と見積もることができる。

リトルボーイ ノート その3:核分裂の時間スケール

「ノートその2」では、リトルボーイは『臨界終了までに1.5cm ほどしか膨れなかった』、また、 核分裂がはじまったときの『実効像倍係数 *K*_{eff}は1.36 であった』と見積もった。このメモでは、核 分裂の時間スケールと中心部温度についてまとめておきたい。

1. 核分裂の時間スケール

・実効増倍係数、は原子炉理論で用いられる概念で、『ある世代』で生まれた中性子の数が原子炉内での吸収分裂の結果、『次の世代』で何倍になっているかを表している。つまり、実効増倍係数は、 『世代増倍係数』であるが、ここではまず、それを『時間増倍係数』に変換する。

『世代の長さ』は、(中性子速度)÷(中性子吸収の平均自由行程)と考えてよい。2 MeV の中性子の速度は 2×10^9 cm/sec で、80%濃縮ウランの吸収平均自由行程 ($1/\Sigma a$)は 18.4cm なので、世代時間 $\tau = 9.2 \times 10^{-9}$ sec (約 10 nsec)となる。t=0 で 1 個の核分裂が起きたとすると、1 世代時間後には 中性子束は K_{eff} 倍となり、核分裂数も K_{eff} 倍となる。つまり、時間 t での(毎秒当り)核分裂速度 f(t) は、

$$f(t) = k_{eff}^{t/\tau_f} = e^{\alpha t}, \qquad \alpha = \frac{\ln k_{eff}}{\tau} \qquad (1)$$

LB の場合、 $\alpha = 33.3 \ \mu \, \text{sec}^{-1}$ となる。この α 値は、原爆としてはかなり小さい (遅い) 値のようで、 ガンタイプ原爆の不効率を示しているようだ。時間 t での積算の核分裂数 F(t)は、①式を積分して、

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = \frac{1}{\alpha}(e^{\alpha t} - 1) \approx \frac{1}{\alpha}e^{\alpha t} \qquad (2)$$

核分裂当りの放出エネルギーは 200MeV であるが、コア部分に蓄積するエネルギーは 2 個の核分裂 片の運動エネルギー170MeV とし、(α 値一定として) 核分裂開始後の蓄積エネルギーを見積もってみ た。Fig. 1 の放出エネルギーは対数表示(ひと目盛り 10⁵) で、Fig. 2 はリニア表示。1 kton 当りの核 分裂数を 1.45×10²³ 個とすると、16kton で 2.32×10²⁴ 個となる。 1 MeV=1.6×10⁻¹² Joule として、 LB コアの内部エネルギーは 6.31×10¹³ Joule となる。Melting point (1405 K) と Evaporation point (4018 K) は、64kg のウランの比熱、融解熱、気化熱を使って計算した。

今中の計算が合っていれば、LBの fission プロセスの継続時間は2μ sec 余りということになり、



1

『100万分の1秒以下』というこれまでの定説と違っている。

コアの膨張にともなってα値も小さくなるので、Fig. 1,2の最終端は傾きが小さくなるはずである。 また、反応度が臨界以下となっても直ちに核分裂がなくなるわけではない。実際のところはダラダラ と減少するであろう。爆発の総出力は、最終段階での『コアの膨張』との関係で決まってくるが、こ こでは臨界以下になると核分裂もゼロになるとして計算してある。

おおざっぱながら、最終段階の 0.1 µ sec で 1.5 cm 膨張したとすると、その『膨張速度は 150 km/sec』 となる。といっても、最終段階での核分裂増加を考えると、この値は『最小値』とみておいた方がよ いだろう。

リトルボーイ ノート その4:コア温度(Ver.1)

1回の核分裂で放出されるエネルギーは約200MeVである。U235核分裂による放出エネルギーの内 訳は以下のようになっている(英文Wikipedia)。

- ▶ 核分裂片の運動エネルギー 169 MeV
- ▶ 放出中性子の運動エネルギー 4.8 MeV
- ▶ 即発ガンマ線(平均1MeV程度) 7 MeV
- FPからのβ線エネルギー 6.5 MeV
- ▶ FPからのガンマ線 6.3 MeV
- β崩壊にともなうニュートリノ 8.8 MeV

2. コアの温度上昇

U235の核分裂により質量数142と92の分裂片ができて170MeVのエネルギーが付与されたとすると、 それぞれのエネルギーは約70MeVと約100MeVで、その速度は1×10⁹と1.5×10⁹cm/secとなる。ウラ ン中での核分裂片の飛程はたぶん10µcm程度なので、FPが直接コア外部へ飛び出ることはない。FP のエネルギーは(ほとんど外に出ずに)周囲のウランに与えられてコアは超高温・超高圧のプラズマ 状態に至るであろう。(プラズマの物理には不案内だが)エネルギーがコア内に留まったとして温度 と圧力を見積もってみた。

▶ 核分裂片のエネルギーは、『FP 原子核と自由電子の運動エネルギー』と『黒体輻射の photon エネルギー』としてコア内に蓄積される。

と仮定しておく。コア温度 T のときの運動エネルギーUkineticは、

$$U_{kinetic} = \frac{3}{2}NkT \qquad (1)$$

ここで、N: 運動している粒子の総数

k:ボルツマン定数(1.38×10⁻¹⁶ erg/deg)

である。Nには、プラズマ中の電子も勘定に入れる。ウラン原子のイオン化状態については、+80~+85 という話が出ていたので、とりあえず 80 としておく。

photon エネルギーUphotonは、黒体輻射の式を用いて、



$$U_{photon} = \frac{4\sigma V}{c}T^4 \qquad (2)$$

ここで、σ:Stephan-Boltzmann 定数 (5.669×10⁻⁵ erg/sec/cm²/K⁴)

 $c: 光速 (3 \times 10^{10} \text{ cm/sec})$

V:コア体積(ここでは半径10.76cmの球、5216cm³)

考える順序が逆のような気もするが、コア温度 T ºK と蓄積エネルギーの関係をプロットしたもの が Fig. 4-1 である。Fig. 4-2 には、時間と蓄積エネルギーの関係を示した「ノートその3」の図と Fig. 4-1 を使って、コア温度の時間変化を示した。2000 万度を越えるあたりから Photon エネルギー が有意になって、4000 万度でほぼ同じ、最終段階では約 6000 万度であるが、その時の蓄積エネルギ ーの 75%が Photon である。



Fig. 4-3 に、温度 T 度 K での黒体輻射 photon のエネルギースペクトルを示す。6000 万度でのピー クは 16keV であるが、このエネルギーの photon のウラン中での半価層は 0.05cm 程度なので、黒体輻 射 photon のほとんどがコア内で吸収される。

リトルボーイ ノート その5:コアの圧力と膨張速度(Ver.1)

5-1. コア中心圧力

高温プラズマで急速膨張する原爆コアのことを考えながら、そもそも『圧力とはいったいなんぞや』 と、教科書などを眺めて首をひねってみた。その結果とりあえず、『圧力』とは、コア空間内で『微 小面を垂直に通過する運動量束』ということで納得した。そうすると、コアでの[運動量密度]×[速 度]×1/3が圧力となる。最後の1/3は、xyz3次元の3である。その4の①②式を参考に、

$$P_{kinetic} = \frac{N}{V} mv \times v \times \frac{1}{3} = \frac{2}{3} n E_{kinetic} = nkT \qquad (1)$$

$$P_{photon} = \left(\frac{4\sigma V}{c}T^{4}\right) \frac{1}{cV} \times c \times \frac{1}{3} = \frac{4\sigma}{3}T^{4} \qquad (2)$$

$$P_{total} = P_{kinetic} + P_{photon} \qquad (3)$$

が得られ、「その4」の①②式を参照し計算してみた(Fig. 5-1)。Fig. 5-2 は、Fig. 4-2 に示した温 度変化に対応する、コア内圧力の時間変化である。



これまで、ものの本などを頼りに、リトルボーイの爆発により『数百万度・数十万気圧』という超 高温・超高圧のコアができた、などと言ったり書いたりしてきたが、今回の見積もりでは『6000万度 で 500 億気圧のコア』となってしまった。ちょっと違いすぎるので、ネット情報などを調べてみると、 温度は数千万度でいいようだが、圧力についてのはっきりした記述は「一般向けサイト」では見あた らなかった。

ただひとつ見つけた学術論文 (A Pritzker & W Halg, "Radiation dynamics of a nuclear explosion" J Applied Math Physics, 32(1981)1-11) では、球形 U235 の爆縮 simulation 計算を報 告しているが、その結果 (α値 Max: 47.3 μ s⁻¹、Total released energy: 9.1×10¹³ J) では、最高 中心圧力が 10¹⁵Pa (約 100 億気圧) を越えているので、今中の見積もりも案外と正しいかもしれない。

5-2. コアの膨張速度

「ノートその3」で、核分裂の進行時間と臨界終了時半径から、コアの膨張速度は『150km/sec 以 上』と見積もった。ここでは、コアの圧力値が得られたのでそこから膨張速度を考えてみる。

コアの周りにタンパーが存在しなければ、photon は光速(3×10¹⁰cm/sec)で、コア物質はその粒 子速度(U235 で 80 km/sec、5800 万度 K) で飛散するであろう。しかし、タンパーが存在すると全く 様相が異なるはずである。力学の基本に基づくなら、

[加速度] = [質量] × [力=圧力勾配]

[速度] = [加速度] の時間積分

[移動量] = [速度] の時間積分

であるが、ここで対象とすべき"圧力勾配"や"質量"がよく分からない。

ということで、参考文献をそのまま"信用"する。

"Introduction to Nuclear Weapon Physics and Design" によると Photon radiation が支配的な 高温高圧での衝撃波 (Marshak Wave) の伝搬速度 D は

$$D = \left(\frac{(\gamma+1)P_{total}}{2\rho}\right)^{1/2} \qquad (4)$$

γ:定圧比熱/定容比熱、photon に対しては 4/3

ρ:物質密度、臨界終了時で12.3 g/cm³

で与えられ、温度の関数としてプロットしたものが Fig. 5-3 である。



Fig. 5-4 の実線(青)は、Fig. 5-3とコア温度の時間変化を使って、膨張速度の時間変化をプロット したものである。その曲線を 2.1 μ sec まで時間積分してみると積算変位量は+4.5cm となった。この 値は、「ノートその2」で見積もった、臨界終了時の半径増加+1.5cm の3倍となる。そこで、Fig. 5-4 の破線(赤)は、実線を3分の1にして、臨界終了時の膨張が+1.5cm となるように調整(Adjust)し たプロットである。臨界終了時の膨張速度は、④式に基づくと『680km/sec』で、Adjust 曲線を使う と『240km/sec』となった。

リトルボーイ ノート その6:0.1~20秒の火球の高さ、大きさ、温度

6月 23 日の広島ミーティングの後、千葉さんから DS86/DS02 で米国側が行った『火球シミュレー ション計算』や『火球温度』について質問があった。DS86/DS02 報告書、SAIC の Egbert さんとの private communication、その他の資料から、爆発後 0.1 秒から 30 秒くらいにかけての fireball 挙動 について『ある程度のこと』を言えそうなのでまとめておく。

♦ DS86報告書 Vol.2 p.81~83

DS86 では、Delayed source の位置を決めるため、STLAMB コードを用いて原爆 Hydrodynamics のシミュレーションが行われている(Fig.1)。爆発高さ(HOB) 580m、爆発力 15kton。



Fig. 1 DS86 での Little Boy STLAMB 計算結果. Air density contour.

STLAMB は、爆発高さと爆発力を input として、空気塊の hydrodynamics シミュレーションを行う が、爆弾の材料・構造は考慮しないようだ。DS86/DS02 では、爆発から 30 秒までのシミュレーショ ンとして、18 個の時間分点(0.0625~22.624sec)についての計算が行われている。Fig.1 は、DS86 報告書に出ている計算結果(空気の等密度線)である。

①0.354sec は、火球が膨脹しその内圧が周辺大気圧と平衡に達した(0.35sec)直後である。火球中 心高さは580m で、中心位置はほとんど動いていない。このとき、火球半径260m、中心密度は2.26E-5 g/cm³となっている(大気密度は1.11E-3)。この段階で衝撃波面は、すでに火球膨脹に先行しており 火球表面の120m 前方にある(Fig.1 ではわからない)。③2.028sec では衝撃波の地表反射の影響が 認められ、④3.067sec は反射波が火球を通過した後である。2 秒後くらいから、火球は毎秒 50~60m の速度で上昇し、10 秒後で約 1100m、20 秒後で約 1600m である。⑤、⑥では火球の形状は、球か らトーラスに形が変化している。

◆ DSO2のSTLAMB計算

DS02 で共同作業をやっているときに、SAIC の Egbert さんから、向こうの計算経過などの file を もらっていた。その中に DS02 の際に行われた STLAMB の outlist file があったので、その打ち出し にある火球高度(Fig.2)や火球半径(Fig.3)などを紹介しておく。

Fig.2 に示されるように、2 秒後以降の火球中心は 61m/sec の速度で上昇している。**Fig.3** の最初の 立ち上がりは、火球の圧力膨脹で、**STLAMB** の outlist によると、0.354sec に火球と大気とが圧力平 衡に至っている。また『5sec 後に Y 方向速度 6.5m/sec で **TORUS** した』との outlist 記述もある。







Fig.4 Air density at the fireball center: DS02 Little Boy

Fig.4 は、火球中心での空気密度である。大気密度は、 1.1×10^{-3} g cm⁻³程度なので、はじめの火球中心の密度(2.26×10^{-5}) はかなり小さい。STLAMBの打ち出しには『温度』はないが、Fig.4 の密度から『火球中心温度』を推定できそうである。0.35sec で大気と『圧力平衡』となったそうなので、理想気体の状態方程式 PV = nRT を考えると、温度は密度に反比例することになる。そこで、大気温度を 300 度 K として、火球中心温度をプロットしてみた(Fig.5)。

Fig.5 の Krasilov は、広島黒い雨の問題に協力してもらっている、旧ソ連の核実験屋さんである。

彼によると、fireball 温度は $T(t) = 7500^{\circ} K \exp\left(-\frac{1}{3}\sqrt{\frac{20}{q}t}\right)$ だそうである(出典、適用条件など不明)。

Fig.5にある1641度Kの水平線は酸化第1鉄(FeO)の融点である。KrasilovとSTLAMBを比べると、 出だしは違っているが、10~20秒にかけてはまずまず合っている、といったところか。



Fig.5 Fireball temperature center: DS02 Little Bov. STLAMB and Krasilov

酸化鉄の融点が出てきているのは、揮発性(volatile) FP(核分裂生成物)と難融性(refractory) FPの沈着挙動に関係してくるからである。つまり、いったんすべて蒸発していた物質(ウラン、FP、 構造材)が、温度低下とともに凝縮して、まず液体(droplet)となり、さらに固体となる。酸化鉄よ り沸点の大きな難融性 FPは、酸化鉄より先に凝縮しており、酸化鉄 dropletの内部に取り込まれる であろう。一方、揮発性 FPは酸化鉄内部にはほとんど取り込まれずに、凝固後の表面に吸着される ことになる。この挙動の違いが、refractoryとvolatileのfraction 効果として、沈着放射能の組 成に影響する。

♦ とりあえずのまとめ

- 爆発後約 20 秒での火球の高さは約 2000m で、上昇速度は約 60m/sec.
- そのときの火球の形はトーラス状で半径約350m(この場合の半径の定義は不明)
- そのときの火球最高温度は約1500度K(火球内で密度分布、温度分布がある)

◆ ちょっとした計算

高さ 2000m において、半径 100m で温度 1500 度の空気塊が 60m/sec で上昇していたとして、そのときの温度低下速度を、黒体放射と断熱膨脹で計算してみた。

<黒体輻射>

Stefan-Bolzmann の式から、温度 T の物質表面からの単位面積当りの放射エネルギーは $I = \sigma T^4$ となる。ここで、 $\sigma = 5.669 \times 10^{-5}$ erg/sec/cm²/K⁴。したがって、半径 100m の球表面からのエネルギ 一放射量は、8.6×10⁹ cal/sec となる。

一方、空気の密度は STLAMB 計算より、2.203×10⁻⁴ g/cm³なので、100m 球では 8.5×10⁸ g。空 気の分子量を 28.8 として、2.9×10⁷ mole となる。空気の定圧比熱を 7 cal/deg/mole とすると、**表 面からの放射にともなう温度低下は 42 deg/sec となった**。

<断熱膨脹>

理想気体が、 V_1 、 P_1 、 T_1 の状態から V_2 、 P_2 、 T_2 に断熱膨脹したとする。物理化学の教科書より、

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{RCp/Cv^2}$$
。ここで、Cp (7 cal/deg/mole)、Cv (5 cal/deg/mole) は定圧比熱と定容比熱で、

R は気体定数(2 cal/deg/mole)。

一方、高さ 2000m の気圧は約 800hPa で、10m 当りに 1hPa 低減する。したがって、2000m から1 秒後に 2060m に達したとすると、P₂/P₁=794/800。T₁=1500 として、これらの値を上の式に入れる と、T₂=1494 度 K となった。つまり、空気塊の断熱膨脹にともなう温度低下は 6 deg/sec となった。

『ちょっとした計算』が確かかどうかは確信がないが、『高温輻射』については気象屋さんのモデル では扱わないだろうから、気象屋さんの土俵に入るまではこんな考察も何かの役に立つような気がし ている。

リトルボーイ ノート その7:放射能雲の高さ、大きさ

11 月の半ばに、Little Boy の Hydrodynamics simulation STLAMB 計算について米国 SAIC の Egbert さんに問い合わせたら、すぐに返事をもらった。DS02 報告書で触れられているのは、"ノー ト その6"で使ったように 30 秒後までだが、180 秒までの計算を以前にやってあったようで、その OUTLIST (アスキー打ち出し)を送ってくれた。Egbert 計算を基に、Nevada の核実験観測データ と比較しながら、Little Boy 放射能雲の高さと大きさなどを考えてみた。

STLAMB 計算結果: 雲の高さ \diamond

STLAMB の主な input は、Yield=16 kton と Height of burst=600 m。OUTLIST 全体は 22MB の巨大なリストで、manualもないまま解読した主要な結果を Table 1 に示す。RFB は "horizontal radius"で RFBM は "vertical radius" と解釈、IFM の意味は不明。Fig. 1 に、雲の中心高さ (HFB) をプロットした。STLABM-1は 30sec までの計算で、STLAMB-2は 180sec まで。

time	RADIUS	RFB	RFBM	HFB	W	RHOFB	PFB	IFM
sec	Shock wave radius, cm	Fireball radius, cm	Fireball radius, cm	Fireball height, cm	Vertical speed, cm/sec	Density, g/cm^3	Pressure, dyn/cm^2	??????
15	5.57E+05	3.25E+04	2.96E+04	1.48E+05	6.34E+03	1.52E-04	8.01E+05	8.76E+00
30	1.06E+06	4.08E+04	3.31E+04	2.35E+05	5.26E+03	2.31E-04	7.19E+05	1.63E+01
45	1.57E+06	4.86E+04	3.62E+04	3.08E+05	4.53E+03	2.56E-04	6.55E+05	2.21E+01
60	2.07E+06	5.62E+04	3.89E+04	3.72E+05	3.99E+03	2.63E-04	6.03E+05	2.68E+01
75	2.58E+06	6.34E+04	4.13E+04	4.28E+05	3.58E+03	2.61E-04	5.60E+05	3.07E+01
90	3.08E+06	7.04E+04	4.35E+04	4.79E+05	3.24E+03	2.56E-04	5.23E+05	3.40E+01
105	3.58E+06	7.72E+04	4.56E+04	5.26E+05	2.95E+03	2.50E-04	4.91E+05	3.69E+01
120	4.09E+06	8.37E+04	4.75E+04	5.68E+05	2.70E+03	2.43E-04	4.64E+05	3.94E+01
135	4.59E+06	8.99E+04	4.92E+04	6.07E+05	2.48E+03	2.36E-04	4.40E+05	4.16E+01
150	5.09E+06	9.60E+04	5.08E+04	6.43E+05	2.28E+03	2.29E-04	4.18E+05	4.35E+01
165	5.60E+06	1.02E+05	5.23E+04	6.75E+05	2.10E+03	2.23E-04	3.99E+05	4.53E+01
180	6.10E+06	1.07E+05	5.37E+04	7.06E+05	1.92E+03	2.17E-04	3.83E+05	4.69E+01

Table 1 Main results of STLAMB calculation up to 180 sec after the explosion.



Fig.1. Height of cloud center after the bombing

昨年、Nevada のすべての核実験観察結果をまとめたレポートを WEB で発見した (Compilation of local fallout data from test detonations 1945-1962 extracted from DASA 1251, Vol.I- Continental U.S. Tests. DNA 1251-1-EX, 1979)。その中から、fireball が地表に touchdown していないと思われ る "空中爆発"の実験結果 7 件をひっぱり出して、STLAMB 計算と比較したものが Fig.2 である。 Nevada 実験の爆発高度は、Little Boy に合わせて HOB=600m として補正してある。Little Boy に 関する STLAMB 計算は、BJ Charlie (14kt) や BJ Dog (21kt) によく似た経過を示している。(計算は雲の中心で、観察は cloud top だが、その差はとりあえず無視。)図を眺めて、Little Boy の雲高 さは『4分後に約 8000m、12 分後に約 12000m』と外挿しておいても問題なさそうである。



Fig.2 Comparison of cloud rising between STLAMB simulation and Nevada

◆ STLAMB 計算結果:雲のサイズ





Fig.3 は、STLAMBの打出しにある RFB と RFBM をプロットしたものである。RFB が雲の水平 方向半径であることは間違いないが、RFBM の定義は明確でなく、とりあえず (雲の形を回転楕円体 と考えて)垂直方向半径と考えた。Fig.4 の a と b は、Nevada 実験のうち、雲の diameter と(top – bottom)がプロットされていた図である。水平方向には時間とともにほぼ一定の速度で広がり、 (Top-Bottom)の大きさは雲の上昇が収まるとほぼ一定となっている。



Fig.4 Cloud size observation in Nevada tests. a: Teapot-Bee, 8 kt, HOB 500ft tower shot. b: Teapot-Apple1, 14 kt, HOB 500ft tower shot.

♦ Little Boy simulation のための雲の高さと大きさ

以上を考慮し、"新 simulation"での初期条件設定に用いる"原爆雲"の高度と大きさ(回転楕円 体または円柱)について、STLAMB 計算と Nevada 観測結果からは、以下の図を提案しておく。



Fig.5 Hiroshima A-bomb cloud height and size based on STLAMB simulation and Nevada observation

リトルボーイ ノート その8:原爆雲の温度

原爆 Fireball (火球)の温度・表面温度については、観測データに基づいて尤もらしい記述や図を 見受けるが、A-bomb cloud (原爆雲)の温度については、調べた限りではデータらしきものはほとん どなかった。広島原爆の local fallout が wet deposition であったことはまず間違いない。wet deposition には rain-out (原爆雲そのものが雨を降らす)と wash-out (雨が原爆雲の粒子を洗い落 とす)が考えられるが、たぶん rain-out の方が重要だろう。Rain-out では原爆雲の温度や湿度が肝 心になる。Egbert さんからもらった STLAMBの output には temperature は入っていないが、density があったので"頭をひねって"温度と関係づけてみた。

♦ STLAMB 計算結果:密度変化

STLAMB の打ち出しによると、爆発 0.4 秒後に fireball は(周辺大気と)『圧力平衡』に達し ている。つまりそれ以降は、原爆雲と周辺大気とは、圧力は同じで密度と温度が異なるという状態と 考えて良い。STLAMB による原爆雲の密度変化(たぶん最高温度部分)とその中心高さでの大気密 度 standard air(理科年表標準大気)を比べたものが Fig.1 である。



Fig.1 Comparison of air density of hottest point in the A-bomb cloud with that of the reference atmosphere at the cloud center height.

ちなみに、STLAMB simulation では、爆弾本体の質量は考慮せず、大気のみを考えているようだ。 そこで、爆発1秒後の fireball の半径(267m)と密度(2.26×10⁻⁵g/cm³)から、fireball の空気質量 を計算すると 1800ton となった。空気質量に比べ、ここでは Little Boy の質量 4 ton は無視していい だろう。

"ノートその6"でも述べたように、今中の理解では、理想気体の状態方程式 PV = nRT を考 えると、温度は密度に反比例することになり、周辺温度が分かれば原爆雲の最高温度も推定できるこ とになる。

◆ STLAMB 計算結果に基づく温度変化

試しに計算してみた原爆雲の温度変化を Fig.2 に示す(ノートその6の Fig.5 も参照されたし)。 1641 度 K は FeO の凝固点、373 度 K は水蒸気の凝集点(気圧で変わるが無視)。一番下の緑の破線 は、原爆雲高さでの標準大気温度(理化学年表より)である。

赤の実線は、モスクワの Krasilov さんの式 $T(t) = 7500^{\circ}K \exp\left(-\frac{1}{3}\sqrt{\frac{20}{q}t}\right)$ である。赤の点線は、

旧ソ連時代からの fallout の大家 Izrael さんの本(Radioactive fallout after nuclear explosions and accidents. 1995 in Russian)の中の式で、20kt の空中爆発に対し、T(t)=4000t^{-0.588} (t<40sec) or 2183t^{-0.374} (t>40sec) である。



Krasilovの式では、80秒後に大気温度と等しくなり、それ以降は原爆雲の上昇が止まることになるので、この式は原爆雲というより fireball に適用される式であろう。Izraelの式の由来ははっきりしないが、STLAMB 計算を低温側に平行移動した感じの曲線になっている。STLAMB は原爆雲の最高温度で、Izraelの式は平均的な温度を示している、ということかも知れない。

STLAMB の 120sec から 180sec の間の温度降下は、706 度 K から 652 度 K へと 54 度 K である。 一方、その間の気圧変化にともなう断熱膨張による温度変化を、理想気体として計算(ノートその 6 参照)してみると 72 度 K となった。STLAMB の温度降下が断熱膨張より小さいのは不可解で、理 由不明である。Izrael の式で、同じく 120sec から 180sec の間の温度降下を計算すると 51 度 K だっ た。

◇ Simulation 計算初期条件設定のための温度変化

原爆雲の温度については、そもそもの定義も曖昧で("雲"の内部でかなりの温度分布があるはずで)uncertainty も大きいであろう。それでも、これまでの議論からある程度の推測は可能であると思われる。いささか"力仕事"となるのを承知で原爆雲温度の外挿を試みたのが Fig.3 である。



Fig.3. Extrapolation of the A-bomb cloud temperature up to 12 min after explosion

緑の破線の Extrapolation は、3min 後の 652 度 K から、『12 分後に 12km の高度で原爆雲の上昇 が止まる、つまり原爆温度は周辺温度と同じになる』と考えて、Izrael の式と同じ "T(t)=a·t-b" を 使って STLAMB-2 を外挿したものである。

296 度 K の水平線は、気温 27 度 C 相対湿度 80%の空気の露点温度。(仮に相対湿度 50%としても 露点は 289 度 K で大した違いはない。)

Fig.3 を眺めて、『そんなに間違ってはいないだろう』という気はしているが、気象 simulation に 『どれだけ役に立つか』も分からない。大胆な間違いがあるかも知れないが、『こんなデータでこう やったらこうなった』ということで何かの参考になれば幸いである。