

目 次

第 1 章 序章	5
1.1 熱照射量	5
1.1.1 热線の被害	5
1.1.2 一瞬で蒸発?	7
1.1.3 热照射量の値	10
第 2 章 エネルギーとしての評価	13
2.1 核爆発のエネルギー	13
2.1.1 単位	13
2.2 計算例	15
2.2.1 10 の個数を数える	15
2.2.2 蒸発	16
2.2.3 機械的エネルギー	20
2.2.4 遙かに大きなエネルギー	21
2.2.5 結論：エネルギーという観点から	26
2.3 TNT 火薬 1 メガトンとの比較	27
2.3.1 反応時間	27
2.3.2 質量比	27
第 3 章 热線	31
3.1 全体としての热輻射	31
3.1.1 エネルギーの分配	31
3.1.2 分配率	31
3.1.3 単純化した状況での計算	33
3.2 热輻射の瞬間的強度	37
3.2.1 仮定	37
3.2.2 黒体輻射モデル	39
3.2.3 4 乗に比例という効果	40
3.2.4 計算例	43

第4章 火球	49
4.1 火球の成長 1	49
4.1.1 透過性	49
4.1.2 デブリ	53
4.1.3 火球の成長・概略	53
4.2 火球の成長（特徴的時間）	55
4.3 時間スケール	60
4.4 瞬間的強度	64
4.4.1 瞬間的強度の評価	64
4.4.2 火球半径	65
4.4.3 初期の熱線	65
第5章 黒体輻射（波長について）	67
5.1 シュテファン・ボルツマンの法則とヴィーンの変位則	67
5.1.1 瞬間的強度	67
5.1.2 ヴィーンの変位則	69
5.1.3 火球の放つ光の波長	70
5.2 波長とエネルギー	72
5.2.1 電子ボルト	72
第6章 ガンマ線の遮蔽	79
6.1 計算	79
6.1.1 単位	79
6.1.2 空気中での減衰	81
6.2 問題点	82
6.3 比重の高い物質による遮蔽	91
6.3.1 質量による遮蔽	91
6.3.2 ガンマ線の減衰	93
6.4 その他の放射線	95
6.4.1 無害な放射線	96
6.4.2 初期放射線と残留放射線	99
第7章 ショック・ウェーブと爆風	101
7.1 核爆発のショック・ウェーブ	101
7.1.1 通常の爆発との相違	101
7.1.2 核爆発におけるエネルギー分配率	102

7.1.3 ショック・ウェーブ	103
7.2 ショック・ウェーブによる被害	106
7.2.1 静加圧と動圧	106
7.2.2 動圧	107
7.2.3 静加圧	107
7.2.4 静加圧の作る爆風	109
7.3 ショック・ウェーブの伝搬	111
7.3.1 最も単純な描写	111
7.4 距離との関係	112
7.4.1 減衰の相似性	112
7.5 計算式	116
7.5.1 「衝撃波と爆風」の被害についての相似性	116
7.5.2 計算例	118
第8章 残留放射線	121
8.1 放射能	121
8.1.1 初期放射線と残留放射線	121
8.1.2 放射線・放射性物質・放射能	122
8.2 残留放射線の減少の速さ	129
8.2.1 7倍で10分の1ルール	129
第9章 参考文献と言い訳	135
第10章 Appendix：核分裂1.	137
10.1 用語の説明	137
10.1.1 原子核と電子	137
10.1.2 陽子と中性子	138
10.1.3 原子核	138
10.1.4 ウラン	139
10.1.5 中性子の割合	140
10.2 核分裂と連鎖反応	141
10.2.1 核分裂	141
10.2.2 連鎖反応	143
10.2.3 結論：核兵器を作るのは難しい	150

第 11 章 Appendix 2: もう少し物理を	153
11.1 核分裂	153
11.1.1 核分裂: 10 の個数を数える	154
11.1.2 電子ボルト	160
11.2 放射線と放射能	165
11.2.1 放射線の強さ	165
第 12 章 Appendix	171
12.1 単位系	171
12.1.1 力と圧力	171
12.2 物理学の定数	173

第1章 序章

それでは、

一切の価値判断から離れて、現象についての記述をする

という立場から、核爆発という現象について考えてみよう。

この立場を明確にするために、最も感性を無視した計算から始める。

簡単な例として、核爆発に絡んでよく使われる表現「一瞬で蒸発」についての計算を紹介する。

1.1 热照射量

1.1.1 热線の被害

人間の皮膚は、1秒以下の短時間で 1 cm^2 あたり 4 cal の熱量を吸収することにより、Ⅱ度の火傷を負う [McNaught pp 58]。

同じ熱量を吸収する場合でも、少し時間を長くして数秒程度での照射になると 4 cal/cm^2 ではなく 6 cal/cm^2 以上の熱量が必要になる。また、同じ時間の照射でも、皮膚の色による差も生じる。

衣類や枯れ草などの燃えやすい周辺物が発火に至る熱照射量は、材質により異なるものの、皮膚にⅡ度の火傷を負わせる熱照射量と同じ程度から、数倍程度までの範囲に収まる。

1 cal の定義は、

$1 \text{ cc} = 1 \text{ g}$ の水の温度を 1 度上昇させる熱量

である。正確には「何度の水の温度を 1 度上昇させるのか」ということを明示する必要があるが、ここでは概算しか必要ないので、この点は無視する。

それでは、一辺が 1 cm の直方体の水が、その 1 つの面から 4 cal/cm^2 の熱照射を浴びたとしてみよう。

1. 照射を浴びる面の面積は 1 cm^2 なので、吸収される熱量は 4 cal であり、
2. この熱量 4 cal が直方体の水 1 cc に等分配されると仮定すると、
3. 1 cc の水の重量は 1 g なので、
4. 温度は 4°C 上昇する。

これは、熱傷や発火という現象から見るならば、僅かの温度上昇である。

なにやら小学校の算数のような話だが、算数の問題と違って、

何を仮定して計算しているか

ということを気にしておくべきだ。実際、等分配されるという仮定は、微妙な問題を含む。

- 热線は、透明な水にすべて吸収されるのだろうか？つまり、水は、热線に対して「不透明」なのだろうか？
- 热線に対して「不透明」であると仮定した場合には、照射を受ける面から奥行き 1 cm^2 に渡って熱量が等分配されるという仮定は、かなり無理がある。

まあ無理はあるのだが、それはそれとして仮定を受け入れて計算してみることも、大切ではある。

一方、熱傷の危険性を評価する場合には、(皮膚のような) 不透明な物体への短時間の熱照射から吸収された熱量は、

等分配される前に照射された表面近くに集中する

として、計算すべき。

仮に照射を受けた面から

- 1 mm 以内に分配されるならば、 40°C 上昇
- 0.2 mm 以内に分配されるならば、 200°C 上昇

となる（比熱についての問題は無視して計算している）。

1 mm 以内に分配される場合、

熱量を引き受ける物質の厚みが $1/10$ になっているので、温度上昇は 10 倍

という理屈で、 40°C の上昇。0.2 mm の場合は、さらに $1/5$ の量に分配されるので温度上昇は 40°C の 5 倍の 200°C という計算である、ひどい熱傷を負うことになる。

これが、生き物に被害を与える、また火災という二次災害を発生させるという点において、核爆発が発生される熱エネルギーの効率を上げているメカニズムなのだ。

ただし、殺害を目的とする効率としてはともかく、殺害を達成するまでの時間的効率は極めて低い。つまり、死が確実な場合であっても、それが実際の死として完結するまでの時間は長い。また、銃弾や爆弾の破片、槍といった体の深部まで一ヵ所にエネルギーを集中させる場合と異なり、効果が皮膚の表面に集中するために、殺害の副作用として刺激する神経の量は大きい。言い換えるならば、残虐である。

結論 感性を無視して記述するのは …… とても難しい。

1.1.2 一瞬で蒸発？

しかし、計算を続ける。

簡単に言うならば、

核爆発により人間が蒸発することはない。

蒸発するとしたら、それは人間が火球の内部に居る場合だろう。

まず、1 cc の水を蒸発させるために必要な熱量は

- 水の温度は 20°C として、 100°C に上昇させるために 80 cal が必要であり、
- さらに、気化熱 539 cal が必要なので、
- 合計で、619 cal が必要

として求められる。正確な値は必要ないので、620 cal が必要としておこう：

数値： 1 cc の水を蒸発させるために必要な熱量は 620 cal（として計算する）

remark. 気化熱というものの自身、考え始めるときりが無い問題を含むのだろうが、ここでは、また、これからの計算でも、そういった微妙な点は考慮しない。あくまでも概算なのであり、簡単にすることが可能な限り、簡単にしたいのだ。

一辺が 1 cm の立方体の一つの面で熱量を吸収すると仮定すると、蒸発させるために必要な熱照射の値は 620 cal/cm^2 であり、皮膚にⅡ度の火傷をもたらす熱照射 4 cal/cm^2 に比べて 100 倍以上の大きさである。しかし、これは爆心点に近ければ十分あり得る値だ。

今度は一辺が 10 cm の立方体の水を蒸発させる場合を考えてみる。この場合、一辺が 1 cm の立方体の体積に比べて

体積比 体積は、 $10^3 = 1,000$ 倍の体積となるのだが、

面積比 照射を受ける面の面積は、 $10^2 = 100$ 倍の面積に過ぎない。

したがって、必要な熱照射の値は

$$620 \times (10^3 \div 10^2) = 6,200 \text{ cal/cm}^2$$

となる。つまり、体積比（相似比の 3 乗）と面積比（相似比の 2 乗）の違いにより、必要な強度（単位面積あたりの熱照射の強度）は相似比に比例して増加する。

後で見るように、この値は、火球の表面にほとんど接している距離でないと実現できない。しかも、短時間の照射による吸収は照射を受けた表面近くに集中するので、表面近くでは蒸発に必要な熱量以上を吸収し（皮膚の場合は焦げてしまい）、逆に表面から離れた部分は蒸発するまでの熱量を受け取ることはできない。

remark. 上の評価の要点は、スケールを何倍かすると

- 体積比は 3 乗
- 面積比は 2 乗

で大きくなるという「算数」の問題である。算数の問題に過ぎず、言われば簡単なことなのだが、意外に見落としやすい。

remark. ただし、スケールを何倍かするという相似比の考え方を用いなくとも、

奥行きが 10 cm で縦横 1 cm の正方形の面を持つ細長い直方体に、正方形の面から熱線を照射する

と考えても、奥行きが10倍になっているのだから、必要な熱量も10倍になるということがわかる。

なお、「身体全体の蒸発」を問題にしているからスケールが絡む、ということに注意。熱傷による被害では、そもそも皮膚表面のみが問題となるので、スケールの影響はあまり受けない。

remark. 热照射を表面で受けるということが前提である。身体全体の蒸発を考える場合でも、あくまでも表面で熱照射を吸収して、その吸収した熱量を身体全体に分配すると考えて計算している。また、暗黙の前提として、表面は熱線に垂直な向きにあると仮定している。斜めの方向から熱線を浴びる場合には、単位面積当たりの照射量は少なくなる。

最後に蛇足の注意を。これはかなり分かりづらく、放射線の被害を扱うまでは必要ではないので、無視した方が良いかも知れない。

後で扱うガンマ線や中性子線など「透過性の高い放射線」の被曝では面積ではなく体積（質量に比例すると仮定）でエネルギーを吸収すると考えることになる。熱線もガンマ線も、物理学の視点からは同じ「電磁波」であるにもかかわらず、「その影響」という視点からは

- 可視光線や熱線は身体の表面近くでほとんど吸収されるが、
- ガンマ線は身体を透過して行く。ただし、
 - すべてが透過するわけではなく、透過し損なったものが被害を与え、
 - 透過し損なう割合は、奥行きが増すと多くなる。

ということに基づいている。つまり、身体はガンマ線に対して「半透明」なのだ。

一般に、透過性の高い（いわゆる貫通力の高い）放射線ほど「危険な放射線」というイメージだが、ほとんど100%透過する放射線ならば、逆に、全く被害を与えない人畜無害な放射線となる。

さらに、難しくなるが、比較的小さな奥行きでのみ

1. 「奥行きに比例して多くなる」と考えることができ、
2. したがって「単位体積当たり」で評価できる

ということであり、比較的小さな奥行きではなくある程度奥行きが長くなると、もはや比例関係は成り立たず、微分方程式と指數関数が登場することになる。

以上、

当たり前のように計算して見せている場合でも、暗黙の前提として仮定していることは意外に多く、背景をきちんと考え始めると、それなりに難しくなる。したがって、少なくとも最初は、暗黙の前提は、あまり追求しないことにした方が良い

ということを結論としておこう。

それとは別に、ここまで結論として、

結論： 火球の内部に取り込まれない限り、ある程度の大きさの物体は蒸発しない。

1.1.3 熱照射量の値

ある地点で受ける熱照射を計算するためには、2つのアプローチがある：

1. 核爆発の規模と爆心点からの距離により、その地点で受ける熱照射（の爆発開始から最後までの総量）を計算する。
2. 火球表面の温度、火球半径、火球の中心からの距離から、熱照射の瞬間的強度（単位時間当たりの強度であり、時間に依存して変化する）を計算する。

ここで直ぐに、これらのアプローチを紹介することもできるのだが、そのような具体的な現象の解析に移る前に、次の章で、エネルギーに絡む計算をいくつか練習する。

核爆発はとにかく膨大なエネルギーだから

という一種の思考停止では話が進まないのだ。

なお、上の2つのアプローチの2番目のアプローチでは、火球表面の温度と火球の半径の移り変わりのデータがあれば、熱線の総量の（例えば）80%を受けるのにかかる時間を計算することも可能である。実際にはこれは実験による経験値なのだろうが、1メガトンを超えるような核爆発では、10秒近い時間が必要なようである。つまり、広島・長崎の規模では

ピカッ

であったものが、大型の核爆発では

ピカッギラー

となるということだ。これも、

突然受けた核爆発に対処することができるか

という点から、大切な違いとなる。

remark. 大型の核爆発が「ギラー」ではなく「ピカッギラー」であり、「ピカッ」と「ギラー」の2つのピークをもつ理由は、2章「火球」で説明する。

remark. また、どちらのケースでも、「ピカッ」の最初に「youtubeの画面が真っ白になる一瞬の閃光」が発生する。キノコ雲ではなくこの閃光が、通常の大規模爆発から核爆発を区別する特徴になる。

remark. さらに、この2つのピークの間隔を器機で測定することにより、核爆発の規模の概算をすることが出来る。

結論： 核爆発の様子は爆発規模により、かなり変わるが、共通の特徴は、一瞬の白色閃光と2つのピークである。規模が大きくなるにしたがって、熱照射のタイムスケールは長くなる。

これは核爆発により生じる火球、および、それが発生・成長するプロセスを通じて理解することが出来るのだが、これについては後で述べることにして、ここでは扱わない。

それでは、核爆発のエネルギーの評価をしてみよう。

第2章 エネルギーとしての評価

2.1 核爆発のエネルギー

熱・爆風・放射線という核爆発の放出するエネルギー全体（核出力）を評価する。これは核爆発に限らず「爆発」という現象すべてについて言えることだが、その威力に比べてエネルギーは、それ程大きくはない。

2.1.1 単位

キロトン・メガトン

「(TNT換算) 1キロトン」の定義は、 10^9 kcalである。

$$\text{数値: } 1 \text{ kt(TNT)} = 1.0 \times 10^9 \text{ kcal}$$

1メガトン(1 Mt(TNT))は、1,000 kt(TNT)である。

remark. 10^9 は $1,000,000,000$ のことであり、つまり、十億のことなのだが、これを

$$\overbrace{10 \times 10 \times \cdots \times 10}^{9 \text{ 個}}$$

と考えること、つまり、

10の個数を数える

というセンスが大切。これについては、後で説明する。

定義

これは定義であり、従って厳密値である。元々の意味は、もちろん、

TNT 火薬 1,000 トンに相当

という意味。しかし、あくまでも定義値として定めているので、「TNT 火薬と言つても色々ある」とか、難しく考える必要はない。

厳密に定められた kt(TNT) という単位を用いてこのように定義してしまった以上、これから、比較の対象として通常の火薬の爆発を考えるときには、

「TNT 火薬」1,000 トンはこの値のエネルギーを放出すると見なす

ということになる。

ジュール

エネルギーの単位は、正式にはジュールを用いるべきであり、ジュールへ換算するならば、

$$\text{数値 : } 1 \text{ kcal} = 4.184 \times 10^3 \text{ J}$$

である。

しかし、身近なエネルギーと比較して、その量を感覚的に掴むためには、「キロカロリー」が適切であろう。

- $1 \text{ kcal} = 1 \text{ Cal}$ の熱エネルギーは、1 L (1 リットル) の水の温度を 1°C 上昇させる。
- 食品の「カロリー (Cal)」で言うならば、昼食は 1,000 kcal (1,000 Cal) 程度である（かなり重めの昼食か？）。

残念なことに、歴史的な事情により、ジュールとカロリーの換算には、様々な異なる数値が用いられる。ただし、相違は大きくない。これから計算は、ほとんどの場合、かなりの誤差を許容する概算なので、換算の相違は無視して良い。

曖昧さ

実際に測定できるかどうかは別にして、 kt(TNT) というものが「定義された厳密値」である以上、曖昧性はないはずなのだが、核爆発の場合「爆発」のエネルギーという言葉自身に曖昧さを含む。

それは、核爆発では

残留放射性物質のエネルギー

という遅れて放出されるエネルギーが存在するためであり、どこまでを爆発のエネルギーと言うべきかは、かなり曖昧なのだ。つまり、核兵器が発生させるエネルギーには「数年後に残留放射性物質が発生させる放射線のエネルギー」も含まれるのだが、これを爆発のエネルギーと言うのは、不自然である。一方、

放射性物質が崩壊して発生させるエネルギーすべてを二次的なエネルギーとして「爆発のエネルギー」から除外する

ということも出来そうに思えるのだが、後で見るように、これもまた、無理。
したがって、

「核兵器が、核兵器の中に含まれていた物質から（最終的に）発生させるエネルギー」の 90% から 95% 程度を「核爆発のエネルギー」（核出力）とする [ENW, pp 8]

としているようだが、それでは実際の評価は、となると、どれだけの反応が行われたのかという評価そのものが大雑把であり、また、政治的利害も絡む。いずれにせよ、これから大雑把な概算しかしないので、この区別はあまり問題にならない。

結論： TNT 換算の「キロトン」は定義値 (10^9 kcal) だが、一方、それを用いた評価には、解釈に掘る曖昧さもあるので、大まかな概算値としてしか扱わないことにする。微妙な問題には深入りしない。

2.2 計算例

2.2.1 10 の個数を数える

核爆発は大きなエネルギーを放出するのだが、巨大隕石の衝突のような、地球そのものの姿を変えてしまうほどのエネルギー、つまり「評価することに意味がない

ほど巨大なエネルギー」というわけではない。したがって、エネルギーの大きさを評価して、大きさの感覚を掴んでおくべきだ。

重さや体積と違って、そもそも、エネルギーの大きさは感覚的に掴みづらい。しかし、それ以上に「感覚的に掴みづらいもの」となっているのは、大きな量そのものではないだろうか。身のまわりの感覚を越える大きな量を感覚的に掴むために「東京ドーム」を持ち出しても、ほとんど意味はない。東京ドームで測ったのでは「大きな量が大きな量であること」がわかるだけで、それを評価することにはつながらない。

「東京ドーム何杯分」は悪習

と言って良いと思う。大切なことは、

10 の個数を数える

ということだ。

エネルギーの大きさの感覚を掴むために、また、一般に「10 の個数を数えて大きな量を感覚的に掴む」ための練習として、核爆発とは直接関係のない例も含めて、いくつかのケースの計算をしてみる。

2.2.2 蒸発

計算例 1. 20 kt(TNT) のエネルギーで池の水を蒸発させてみる：

1. 19 °C の水 1 L を蒸発させるためには、まず温度を 100 °C まで上昇させてから気化熱 539 kcal/L を加えると考えて、

$$(100 - 19) \text{ kcal} + 539 \text{ kcal} = 620 \text{ kcal} = 6.2 \times 10^2 \text{ kcal}$$

が必要なので、

2. $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$ の水を蒸発させるためには

$$(6.2 \times 10^2 \text{ kcal}) \times 10^3 = 6.2 \times 10^5 \text{ kcal}$$

が必要。なお、 $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$ という数値は、

(a) 1 L は一辺が 10 cm の立方体で

- (b) 1 m^3 は一辺が 100 cm の立方体なので,
(c) 両者の体積比は、相似比 $100 : 10$ の比の値 10 の 3 乗であり,
(d) $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$

として得られる。

3. ここで、計算しやすいように 6.2 kt(TNT) の熱エネルギーを考えてみると、

- 6.2 kt(TNT) の熱エネルギー $6.2 \times 10^9 \text{ kcal}$ は、
- 1 m^3 の水を蒸発させる熱エネルギー $6.2 \times 10^5 \text{ kcal}$ の

$$\frac{6.2 \times 10^9 \text{ kcal}}{6.2 \times 10^5 \text{ kcal}} = 1 \times 10^{9-5} = 10^4 \text{ 倍}$$

なので、 10^4 m^3 の水を蒸発させる。

4. つまり、例えば

縦・横・深さがおよそ $100 \times 100 \times 1$ メートルの池

を完全に蒸発させることになる。

したがって、20 kt(TNT) のエネルギーをすべて使うと、つまり、6.2 kt(TNT) の約 3 倍のエネルギーを使うと、

縦・横・深さがおよそ $300 \times 100 \times 1$ メートルの池

を蒸発させることが出来る。「300 m は 100 m の 3 倍」という意味では

$6.2 \times 3 = 18.6 \text{ kt(TNT)}$ のエネルギーが蒸発させる水

とすべきなのだが、約 20 kt(TNT) という程度の概算で良いことにする。

remark. $(6.2 \times 10^2 \text{ kcal}) \times 10^3 = 6.2 \times 10^5$ という計算は

$$(6.2 \times 10 \times 10 \text{ kcal}) \times 10 \times 10 \times 10 = 6.2 \times \overbrace{10 \times \cdots \times 10}^{2+3 \text{ 個}} \text{ kcal}$$

という理屈。割り算の場合は、10 の個数の引き算となる。

計算結果

1. 6.2 kt(TNT) の熱エネルギーにより、 10^4 m^3 の水を蒸発させることができる。

2. 20 kt(TNT) の熱エネルギーにより、縦・横・深さがおよそ

$300 \times 100 \times 1$ メートル

の池の水を蒸発させることができる。

しかし、これは「膨大なエネルギー」という程のものなのだろうか。むしろ、太陽が時間をかけて行う作業の偉大きさを見せつけられているような印象だ。

確かに、単純にエネルギーの大きさというだけならば、その通りなのだが、核爆発に限らず爆発というものの威力は、そのエネルギーを「短時間で放出する」という点にあるのだ。

なお、計算式の途中で単位を書いてあつたりなかつたり、等号の左辺に単位が書き込まれていたり数値のみであつたりと首尾一貫していないのだが、気にしないで欲しい。後で何度か触れることになるが、単位記号の取り扱いは、考え始めると、なかなか厄介なのだ。

また、

$$1 \times 10^4, \quad 1.0 \times 10^4, \quad 1.0000 \times 10^4$$

といった表記の違い（もしくは工学的に正しい表記の使い方）にはこだわらず、 10^4 m^3 のような（数学的な）表記で済ますことにする。

remark. 工学では、概算の精度の評価は必須であり、そのための決まりが色々あるようだ。しかし、一方で、このような決まりは

ほぼこのくらいの値

という柔らかな「概算」の試みを萎縮させてしまう副作用があり、教育課程への「およそのかず」の導入の歴史は、副作用による失敗の歴史と言って良いと思う。ここでは、徹底して「非工学的な概算」で押し通す。

計算例 2. 半径 100 メートルの水球（温度は約 20°C ）を蒸発させるためには、2.5 Mt(TNT) の熱エネルギーが必要。

半径 $r = 100$ m の球体の体積は（こういうときにこそ、あの近似値 $\pi \doteq 3$ を用いて）

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \doteq 4 \times (10^2)^3 = 4 \times 10^6 \text{ m}^3$$

であり、6.2 kt(TNT) の熱エネルギーが 10^4 m^3 の水を蒸発させるという結果を用いると、

$$\begin{aligned} & 6.2 \text{ kt(TNT)} \times (4 \times 10^6 \text{ m}^3 \div 10^4 \text{ m}^3) \\ &= 6.2 \text{ kt(TNT)} \times 4 \times (10^6 \div 10^4) \\ &= 24.8 \times 10^{6-4} \text{ kt(TNT)} \\ &\doteq 2.5 \times 10^3 \text{ kt(TNT)} \\ &= 2.5 \text{ Mt(TNT)} \quad \Leftarrow 1 \text{ Mt(TNT)} = 10^3 \text{ kt(TNT)} \end{aligned}$$

のエネルギーが必要になる。

remark. $(10^2)^3 = 10^6$ という計算は、

$$(10 \times 10) \times (10 \times 10) \times (10 \times 10) = \overbrace{10 \times \cdots \times 10}^{2 \times 3 \text{ 個}} = 10^6$$

という理屈。

2.5 Mt(TNT) という核爆発は、大きめの水爆である。しかし、それを水中で爆発させて、全エネルギーを蒸発に用いることができたと仮定しても、この大きさの水球しか蒸発させることは出来ないのだ。つまり、

「超巨大核爆発」といえども、琵琶湖を蒸発させることは不可能。

計算例 3. 20 kt(TNT) の熱エネルギーは、およそ二千万人分 (2×10^7 人分) の昼食のエネルギーである。

これは、一人あたりの昼食を $1000 \text{ kcal} = 10^3 \text{ kcal}$ として

$$10^3 \text{ kcal} \times (2 \times 10^7) = 2 \times 10^{10} \text{ kcal} = 20 \text{ kt(TNT)} \quad \Leftarrow 1 \text{ kt(TNT)} = 10^9 \text{ kcal}$$

と計算した結果である。まあ、全員がそのような重い昼食を摂るとは考えづらいので、四千万人分としておいた方が無難ではあるが。

以上、繰り返しになるが、結論を言うならば、一般に「爆発」というものを「エネルギー」という観点のみから評価するのは、適切ではない。

2.2.3 機械的エネルギー

破壊力が運動エネルギーにより実現されている場合には、さらに極端である。

次の例で、砲弾の運動エネルギーを運動エネルギーの式

$$\frac{1}{2}mv^2$$

を使って計算するが、どの単位での数値を使えば良いか不安になるかも知れない。実は、色々な物理量の単位の選び方（単位系）として、

1. cm, g, erg (エルグ) を基準とする単位系（旧式）
2. m, kg, J (ジュール) を基準とする単位系

とふた通りの単位系があり、そのためにミリバールをヘクトパスカルと読み替えるような羽目になっている。ここでは、現代的な m, kg, J 系を用いる。一貫してこの単位系を使えば、公式に数値を代入するだけで正しい結果が得られる。

ただし、ケースによっては、旧式の単位系の名残を引きずっている面もあり（例えば、アボガドロ数を使った換算はグラム単位），また、cm² や L (リットル) を使った方が考えやすい場合もある。実際、これまでも cm², L も用いてきた。ただし、その場合は、換算に注意する必要がある。

計算例 4. 砲弾の運動エネルギーを、熱量に換算して評価してみよう。例えば、秒速 1000 メートルで飛ぶ 1 キログラムの砲弾の運動エネルギーは、約 100 kcal に過ぎない。

これは、ジュールで求めた運動エネルギー

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (10^3)^2 = 5 \times 10^5 \text{ J}$$

から

$$1 \text{ kcal} = 4.18 \times 10^3 \text{ J} \doteq 5 \times 10^3 \text{ J}$$

という荒い近似で換算した値。

逆に言うならば、破壊力という点から見るならば、

機械的なエネルギーは熱エネルギーよりも効率が良い。

したがって、多くの兵器は、火薬の発生させる熱エネルギーを機械的なエネルギー（銃弾や破片、爆風の運動エネルギー）に変換することにより、「破壊力」を高めているということになる。

後で見るように、通常の爆発に比べて核爆発では、熱輻射として放出されるエネルギーの比率が高い。したがって、核爆発は（被害を与えるという点で）効率が悪いに思えるのだが、実際には、輻射熱を皮膚の浅い部分で集中して受け取るという効果のため、甚大な被害を与える。

結論： エネルギーという観点からのみ核爆発の「すごさ」を述べても、あまり意味はない。

2.2.4 遙かに大きなエネルギー

核爆発を遙かにしのぐエネルギーの例として、巨大隕石の衝突について計算してみよう。ただし、巨大隕石と言っても、直径 1 km, 10 km, 100 km では、その影響の凄まじさは全く異なる。直径 1 km と直径 100 km では、エネルギーの比は 100 万倍であり、これがどのような「凄まじさの相違」となるかを東京ドームで測ろうとしても、無理。10 の個数を数えること、つまり、

直径 1 km と直径 100 km では、エネルギーは 10 の個数が 6 個違ってくる

と 10 の個数を数えない限り、「評価不能な程の凄まじさの評価」は不可能である。

なお、数値のオーダー（10 の個数）ではなく係数となる数値の計算は、無理に近似値を用いて暗算するよりも、関数電卓を用いてしまった方が疲れない。この場合、逆に問題の設定よりも無意味に精度の高い数値が現れることになるが、これも気にしないことにしよう。

ただし、10 の個数は、関数電卓に頼らず、数えるべきである。この積み重ねが、数値の大きさに対する感覚を鍛えるのである（たぶん）。

核爆発のような身のまわりの感覚からは「途方もないスケール」の現象を理解するためには、核爆発の個々の側面についてのテクニカルな知識よりも、

とにかく 10 の個数を数えて大きさを掴む

という姿勢を養う方が、遙かに有益だと思う。更に、特に放射能に絡む理解には 10 の個数は不可欠である。それなしにベクレルという単語が現れる記事を読んでも、それでは心靈スポットや祟りについての記事と変わりはないことになってしまう。

計算例 5. 半径 1 m, 比重 1 の隕石が秒速 20 km/s で衝突するときの運動エネルギーは 8.37758×10^{11} J であり、これが熱エネルギーに変わると 2.0023×10^8 kcal になる。

まず、半径 r の球体の体積 V は

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = 4.1888 \times r^3$$

である。つぎに、比重 1 ということの意味だが、これは

1 L の質量が 1 kg

ということなので、

1 m³ の質量は 10^3 kg (比重 1 の場合)

である。したがって、この隕石の質量は

$$(4.1888 \times r^3) \times 10^3 \text{ kg}$$

であり、ここでは $r = 1 \text{ m}$ としているので、質量は、

$$4.1888 \times 10^3 \text{ kg}$$

である。後は、運動エネルギーの公式

$$\frac{1}{2} m v^2$$

に、この質量と速度 $v = 2 \times 10^4 \text{ m/sec}$ を代入して

$$\frac{1}{2} \times (4.1888 \times 10^3) \times (2 \times 10^4)^2 = 4.1888 \times 2 \times 10^{11} = 8.3776 \times 10^{11} \text{ J.}$$

また、1 kcal = 4.184×10^3 J なので、

$$8.3776 \div 4.184 \times 10^{11-3} = 2.0023 \times 10^8 \text{ kcal.}$$

もちろん、2.0023 という係数は、小数点以下の桁が無意味に大きいのであり、せめて

$$2.0 \times 10^8 \text{ kcal}$$

としておくべきだろう。ここでは、そのような工学的な良識は無視してみたのだが、やはり、ものすごくセンスが悪い。

計算結果

半径 1 m、比重 1 の隕石が秒速 20 km/s で衝突するときのエネルギーは、
 $2.0 \times 10^8 \text{ kcal}$

としておこう。

remark. 隕石の比重が 1 とは、ずいぶん軽い隕石なのだが、現実的設定の下でエネルギーを計算するときには、後から本当の比重をかけて求めれば良い。そのためには、比重 1 としておいた方が使い勝手が良い。「かけて求めれば良い」と言えるのは、

- 質量 m が比重に比例し
- エネルギー $\frac{1}{2}mv^2$ が質量 m に比例する

からであり、半径 r や速度 v には通用しない。

計算例 6. 直径 100 m、比重 3 の隕石が秒速 20 km/s で衝突するときのエネルギーは 75 Mt(TNT)。

半径 1 m のケース（エネルギーは $2.0 \times 10^8 \text{ kcal}$ ）と比較して、

1. (直径 100 m なので) 半径は 50 m (1 m の 5×10 倍) なので体積は

$$(5 \times 10)^3 = 125 \times 10^3 = 1.25 \times 10^5 \text{ 倍}$$

され、さらに、

2. 比重は 3 なので質量は 3 倍されるので

発生するエネルギーは

$$\begin{aligned} & (2.0 \times 10^8 \text{ kcal}) \times (1.25 \times 10^5) \times 3 \\ & \doteq 7.5 \times 10^{13} \text{ kcal} \\ & = 7.5 \times 10^4 \text{ kt(TNT)} \quad \Leftarrow 1 \text{ kt(TNT)} = 10^9 \text{ kcal} \\ & = 75 \text{ Mt(TNT)} \quad \Leftarrow 1 \text{ Mt(TNT)} = 10^3 \text{ kt(TNT)} \end{aligned}$$

となる。

直径が 10 km ともなると、直径 100 m の場合に比べて

$$100^3 = 10^6$$

倍であり、発生するエネルギーは現存するすべての核兵器が発生させるエネルギーを遙かに超えるレベルである。

直径 100 m と 10 km では、直径の比は 100 倍であり、それも確かに大きいのだが、エネルギーの比は圧倒的である。トリックは、

体積は直径の 3 乗に比例する

ということであり、要するに直径 10 km の物体は膨大な質量をもっているということ。

一方、

- 比重の違いは比例で影響するだけであり、
- 速度の違いも 2 乗なので、比重の違いよりは大きな影響を与えるというもの、体積における 3 乗ほどの影響ではない。

remark. 後で扱う黒体輻射では、温度の 4 乗という関係がでてくる。この場合には、温度が 2 倍になると輻射の強度は 16 倍になる。

それでは、衝突のエネルギーがすべて、地球の大気に熱として吸収されるとして、空気の温度上昇を計算してみよう。

必要なデータは

- 1 kg の空気の温度を 1 K 上昇させるには、0.24 kcal が必要。
- 地球の大気の総量は、約 5.3×10^{18} kg

だけである（大気の温度とか定圧比熱だとか面倒なことは無視して、この数値で良いことにしましょう）。

計算例 7. 直径 100 m, 比重 3 の隕石が秒速 20 m/s で衝突し、そのエネルギーがすべて大気に熱として吸収されると仮定する。このとき、大気全体の温度は約 6×10^{-5} K 上昇する。

計算例 6 の結果を用いると、衝突のエネルギーは 7.5×10^{13} kcal であり、そのすべてを大気の総量 5.3×10^{18} kg に等分配すると、大気 1 kgあたりが受け取る熱エネルギーは

$$\frac{7.5 \times 10^{13}}{5.3 \times 10^{18}} \text{ kcal} = 1.415 \times 10^{-5} \text{ kcal}$$

となる。したがって、温度上昇は

$$(1.415 \div 0.24) \times 10^{-5} = 5.598 \times 10^{-5} \div 6 \times 10^{-5} \text{ K}$$

remark. ここで、単位 K はケルビンであり、摂氏 °Cとの違いは、

–273.15 °C（絶対零度）を零として計る

という点だけなので、「何度上昇するか」という意味では、両者の違いは生じない。物理では、温度の単位としてケルビンを用いるのが普通（であり、また自然）なので、日常の感覚と比較したい場合以外では、ケルビンを用いることにする。

つまり、この程度の隕石の衝突では、大気の温度はほとんど上昇しない。もちろん、衝突のエネルギーがすべて大気に吸収されるのは隕石が大気中で完全に「燃え尽きた」場合に限られ、また、その場合でも、衝撃波はそれなりの被害を与えるかも知れない。それでも、地球全体でみれば、ほとんど影響はない。

しかし、さらに大きさが 1000 倍になると、つまり、直径 100 km となると、質量は

$$1000^3 = (10^3)^3 = 10^9$$

倍になるのであり、地球の全大気が

$$6 \times 10^{-5} \times 10^9 = 6 \times 10^4 \text{ K}$$

だけ温度が上がる（空気の温度が 6 万度上昇）。これは、全生命絶滅の領域になっている。このくらいのサイズになると、仮に粉々にして大気中で燃え尽きるようにすることができたとしても、絶滅は免れそうもない。それどころか、逆効果かも知れない。隕石が地表に衝突したならば地殻が受け取ってくれるはずだった熱量も、すべて大気を熱するために使われることになるのだから。一方、粉々にならずに衝突した場合には、その巨大な直径により地殻に穴を開けてしまい、圧力から解放されて溶解した岩石が、地表に吹き出てくるのかも知れない。いずれにせよ、地球上の生命にとっては、結果は変わらないのだが。

2.2.5 結論：エネルギーという観点から

熱エネルギーは、エネルギーのなかで最も効率の悪いエネルギーである。さらに熱エネルギーが地表全体、海洋全体、大気全体といった地球規模の「全体」に等分配されるとして絶滅を招く規模のエネルギーとなると、途方もない大きさが必要になる。このような巨大なエネルギーと比較するならば、全面核戦争といえども全生命絶滅というレベルからは遙かに遠い。イエローストーンの巨大カルデラ噴火もまた、エネルギーの等分配という観点で言うならば絶望的という程のものではない。実際には北半球の人類にとっては絶望的であるにしても。

熱エネルギーの等分配という観点のみで全生命絶滅を心配するならば、それは巨大隕石か太陽活動の（たとえ短期的であったとしても）異常に大きいではないだろうか。ただし、百年以上かけての絶滅ならば、なんらかのメカニズムで大気のエネルギー収支が回復不能なレベルまで崩れてしまうことの方が、可能性が高そうだ。

なお、知性的な生き物としての人類絶滅だけならば、可能性は多すぎて検討不能である。そもそも、自然放射線の影響だけでも、人類という生き物の能力は、長期的に衰退しつつあるのかも知れないのだから（という妄想）。

2.3 TNT 火薬 1 メガトンとの比較

爆発という現象を、エネルギーという面だけ評価することはできない。そもそも、そのエネルギーが短時間で解放されるのでなければ、爆発と言うに値しない。それでは、次に、同じ短時間の「爆発」である通常火薬の爆発と核爆発を比較してみよう。

TNT 爆薬 10^6 トン（1 メガトン）は、比重を 1.6 として計算するならば、およそ一辺 100 メートルの空き地に高さ 60 メートルに積み上げた量となる。これを一気に燃焼させれば、発生するエネルギーは 1 Mt(TNT) となるわけだ。この爆発と、これと同じ出力の核爆発を比較する。

remark. 一辺 100 m で高さが 60 m というと、大したことのない量に感じるが、これは「体積は相似比の 3 乗に比例」という効果のもたらすマジックであり、重量で見れば、百万トンの火薬は、やはり、とてつもない量の火薬である。

2.3.1 反応時間

まず思いつくのは、短時間の反応とは言っても、「短時間」である程度に違いがあることだ。核爆発では、だいたい 10^{-6} sec = 1 μ sec（百万分の 1 秒）以内で反応は完結するのだが、これに匹敵する短時間で百万トンの爆薬を燃焼させるためには、1 cm 刻みで点火しない限り不可能であろう。しかし、「すべての部分が等温になるようにゆっくりと加熱して行く」などの方法で（たぶん無理だが）、1 μ sec で爆薬の燃焼を完結させることが出来たと仮定しよう。

こうして反応時間を揃えたとしても、決定的相違点として、発生するエネルギーを引き受ける質量の違いがある。

2.3.2 質量比

1 Mt(TNT) の爆薬の重量は、もちろん、1 メガトンとして評価するのだが、一方、「出力 1 Mt(TNT) の核弾頭の重量は？」となると、これは確定しない。ここでは、評価を簡単にするために、1 トンとしておこう。また、特に断らない限り、1 Mt(TNT) に限らず、20 kt(TNT) でも 50 Mt(TNT) でも、すべて 1 トンと評価してしまうことにする。これは、核弾頭の重量の大部分は、プルトニウムや三重水素といった「核燃料」ではなく、爆縮に使う爆薬や筐体なので（これは 50 年前の感性かも知れな

いが気にしないことにしよう），それほど乱暴な見積もりではない（ということにする）。

なお，以下では「筐体」という言葉は，ケースとしての筐体だけでなく，弾頭を構成する物質すべてを意味するものとし，反応済みの筐体の残骸をデブリと言うことにする。

remark. 50 Mt(TNT) の巨大な水爆となると，さすがに 1 トンという見積もりは乱暴であり，数十トンの重量にはなるらしいのだが，これも気にしないことにしよう。

核弾頭の筐体の重量を 1 トンと仮定すると，

- 「1 Mt(TNT) の爆発」を発生させる爆薬と
- 核弾頭

の重量比は

$$10^6 : 1 \quad (\text{爆薬} : \text{核弾頭})$$

である。仮に両者共にエネルギーすべてが熱エネルギーとして（爆薬の場合は 1 メガトンの燃焼済み爆薬に，核弾頭の場合はデブリに）吸収されると仮定し，さらに，比熱の違いを無視してしまうと，反応直後の温度比は

$$1 : 10^6 \quad (\text{爆薬} : \text{核弾頭})$$

になる。

爆薬の場合は数千度なので，単純計算をすると数十億度ということになるのだが，実際には，比熱の違いがあり，また，これほどの高温になると比熱そのものが変化するので，数十億度とまではいかないようである。それでも，“several tens of million degrees” [ENW, pp 27] であることは確かである。

なお，

核反応のエネルギーすべてが熱エネルギーとしてデブリに吸収される

という仮定は，後でるように「すべて」ではないにしろ「かなりの部分」という意味において正しい。

remark. ここでの比熱に基づく説明はかなり乱暴なのだが，それでは乱暴でない説明はと言われると，難しい。エネルギーと違って「温度」という概念は扱いづら

いのであり、要するに、とても難しい。爆発当初の温度については、それが「核融合に点火するに十分か」という問題も含めて、これ以上立ち入らないことにする（と言うより、立ち入るのは無理）。

超高温のデブリ

立ち入らないにしても、このような高温の、そしてその帰結として高圧のガスとなったデブリの振る舞いとして重要なのは以下の点である：

黒体輻射の公式により、極めて急速にエネルギーを輻射し、その輻射の波長はエックス線の帯域になる。

このエックス線は、普通の高度の空気中ではほとんどすべて空気に吸収され、後で説明するプロセスで火球を発生させる。そして、その火球が成長していき、ふたたび黒体輻射の公式により、（火球発生のタイムスケールから見れば）ゆっくりと熱線を輻射し、広大な地域に被害を与えることになる。

一方、爆薬の燃焼温度では「熱輻射」としてエネルギーを消費する率は少なく、その「高熱」は、周囲の空気と共に「高圧」のガスとして衝撃波を発生させ「爆発」することにより、[流体力学的に] 発散されることになる（実際には、高温のガスからなる火球として上空に逃げて行く割合が高そう）。

核爆発の場合でも高圧のデブリは衝撃波を発生させるのだが、通常の爆薬による爆発との顕著な相違は、熱輻射の比率が大きいことであろう（もちろん、放射線の有無という違いもあるが）。

これらのプロセスは、後で扱う。

第3章 热線

3.1 全体としての热辐射

大気中の核爆発は火球を発生させる。火球は热線を辐射しながら热エネルギーを失い、また、浮力により上昇し拡がり「キノコ雲」の傘の部分に変わっていく。火球が成長する途中で火球から衝撃波（ショック・ウェーブ）が離れて行き、それが爆風としての被害をもたらす。火球の成長については後で扱うことにして、ここでは火球から放たれる热線の总量に基づき、热線の被害と爆心点からの距離との関係について、計算をする。

最初に、結論を言ってしまうと、

核出力（核爆発により放たれるエネルギー）の約 35 % が热線のエネルギーとなり、爆心点から R km の地点では、そのエネルギーを半径 R km の球面に等分配した熱量の照射を浴びることになる。

ただし、これはかなり曖昧な点を含み、また単純化した描写なので、注釈が必要である。

3.1.1 エネルギーの分配

3.1.2 分配率

経験則としての分配率

核爆発により発生するエネルギーは、大きく分けると

1. デブリに吸収させずに放たれた放射線のエネルギー
2. デブリにいったん吸収されたエネルギー

に分けることができる。デブリに吸収されるエネルギーの比率を下げるることにより「中性子爆弾」と呼ばれるものを作ることができるようだが、ここではそのような例外的なものは無視することにしよう。それでも放射線のエネルギーというものは、核分裂破片が時間的な遅れを伴って放射線を発するという現象のために、捉え方次第で数値が変わってくる。そのような厄介な問題はひとまず置いておき、最終的に被害を与えるエネルギーという観点からの分配比率は、経験則として以下の比率となると考えられている [McNaught pp 40] :

エネルギー配分の比率

熱線のエネルギー	約 35%
爆風のエネルギー	約 50%
放射線のエネルギー	約 15%

おそらく、これは大雑把な経験則であり、理論的な根拠のあるものではないはずだ。

分配率についての注

熱線の被害を全体して計算するためには、核爆発の出力に 0.35 を掛ければ良い。

これだけのことなのだが、考え始めるとなかなか厄介なのである。列挙してみよう。

- 放射線のエネルギー 15% の中には、かなり遅れて放射される放射線（残留放射線）のエネルギーも含まれている。一方、「核爆発の規模」と言った場合には、「爆発」と呼ぶには相応しくない程に遅れて放射されるエネルギーは取り除かれているので、0.35 をかけるべき「核出力」が何を意味するかという問題が残る。しかし、これについては、そもそも「50 メガトン」とか「15 キロトン」と言っても、それはかなり粗い評価による数値なので、気にしなくとも良いのかも知れない。
- 逆に火球含まれる放射性物質のうち、短時間で崩壊するもののエネルギーは、それなりの比率で火球の中の熱エネルギーに変わると考えられる。しかし、これも考えないことにする。
- 火球は熱エネルギーを熱線として輻射し冷えて行くのだが、冷えると言ってもまだ赤く輝く程度には熱いままで、キノコ雲の傘に変わっていく。この残された熱エネルギーは、キノコ雲の足の部分から上昇して来た汚れた不透明な空

気と混ざり、火球は熱線の被害という観点からは「安全」なものに変わって行く。この熱線の被害という観点からは「無駄になる」熱エネルギーの比率は不明である。これは爆発の規模によっても大きく変わり、火球が極端に大きい場合は「冷える」までに時間を要するので「無駄になる比率」は大きくなりそうだが、これも無視することにする。

つまり、35%という数値は、「およそこの程度」という数値なのである。

空気による吸収

火球から放たれた熱線は、空気によって吸収・散乱され弱まる。どの程度弱まるかは空気の透明度・湿度等により異なり、また、散乱の影響は、例えば、火球より上に雲がある場合には

本来宇宙空間に逃げるはずだった熱線まで反射されて戻ってくる

などの効果もあり、複雑である。しかし、その影響は、数十キロ先で10分の1になるとか百分の一になるといったオーダーではなく、よほど大気が不透明でない限り、何割か減少するという程度のものなので、無視することにしよう。

雲による反射は本当は無視できないのだが、それを承知で無視することにして計算を進める。一方、地面からの反射については、よほど特殊な状況でない限り（例えば地面が雪で覆われているといった状況でない限り）、かなり安心して無視できる。

なお、熱線ではなく爆風の解析となると、爆風は地面で反射され、その影響を無視することは出来ない。

3.1.3 単純化した状況での計算

大気中での核爆発

それでは、状況を次のように単純化して、爆心点から R km 離れた地点で受ける熱線の総量を求めて見よう。以下の仮定をする。

1. 核出力の 35% が熱線として輻射されるとして計算する。
2. 空気による吸収と散乱は無視する。

3. 爆心点は、火球が地面に触れない程度の上空にあるとする。
4. 火球の中心は、熱エネルギーのかなりの比率を放射し終わるまで、あまり上昇せず爆心点近くに留まるとし、火球の上昇の影響は無視する。
5. 火球が不透明な「キノコ雲」に包まれ熱線が遮られる効果も、その時点までに熱輻射がほぼ終了していると仮定して、無視する。
6. 热線は、すべての方向に均等に輻射されるとする。

これだけ仮定してしまえば、後は単純な計算であり、輻射される熱エネルギーの総量を半径 R の球面の面積で割るだけで、単位面積当たりで吸収される熱エネルギーが求められる。

計算例 8. 空中での 1 kt(TNT) の核爆発から斜距離 1 km の地点で受ける単位面積あたりの熱量は

$$2.78 \text{ cal/cm}^2.$$

$$\begin{aligned} \frac{1 \times 10^9 \text{ kcal}}{4\pi \times (1 \text{ km})^2} \times 0.35 &= \left(\frac{0.35}{4\pi} \right) \times \frac{1 \times 10^9 \times 10^3 \text{ cal}}{(1 \times 10^3 \text{ m})^2} \\ &= 0.0278 \times \frac{1 \times 10^{12} \text{ cal}}{(1 \times 10^5 \text{ cm})^2} \\ &= (2.78 \times 10^{-2}) \times \frac{1 \times 10^{12} \text{ cal}}{1 \times 10^{10} \text{ cm}^2} \\ &= 2.78 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

それでは、

1 kt(TNT) の核爆発から斜距離 1 km の地点では 2.7 cal/cm^2

という値を基にして計算してみよう。その他の核出力（核爆発の規模）、距離（斜距離）については、

- 1 kt(TNT) に比べての核出力 W に比例し
- 1 km に比べての距離の 2 乗に反比例する

ということから、簡単に計算することが出来る。

remark. 上の計算例での数値は 2.78 なのだが、小数点 2 桁まで使うのは、このような粗い概算では考え方なので、減衰を少し考慮して 2.7 という値を使うことにした。

remark. 1 cm² 当たりのカロリーとして計算した理由は、皮膚にⅡ度の火傷を負わせる熱量が 4 cal/cm² であることを、比較の基準としたいからである。1 kt(TNT) という小さな核爆発では、1 km 離れていればⅡ度の火傷は負わないで済む。

計算例

計算例 9. 16 kt(TNT) の核爆発の爆心点から距離 2 km の地点で受ける熱線は

$$2.7 \times 16 \div 2^2 = 10.8 \text{ cal/cm}^2$$

計算例 10. 10 Mt(TNT) の核爆発の爆心点から距離 20 km の地点で受ける熱線は

$$2.7 \times (10 \times 10^3) \div 20^2 = 2.7 \times 25 = 67.5 \text{ cal/cm}^2$$

ただし、距離が 20 km となると、途中の空気による吸収は無視できない大きさになると考えられるが、それでも、晴天で透き通った大気の状態ならば、桁が違ってくる程の効果にはならない。なお、後に計算する放射線の場合には、距離が大きくなると空気による吸収はかなり頗りになるものであり、大型の核爆発の被害については、熱線の被害が最も遠方まで及ぶことになる。

「桁が違ってくる程の効果にはならない」のだが、「桁が違わない」というだけで、精度は期待できない。

[マクノート 64p] での数値に当てはまる係数を求めるとき、2.7 より小さな数値

- 1 kt(TNT) で斜距離 0.82 km では、4 cal/cm²
(この数値となる係数は 2.7)

- 1 kt(TNT) で斜距離 1 km では 2.6 cal/cm^2
(この数値となる係数は 2.6)
- 1 Mt(TNT) で斜距離 21 km では 1.76 cal/cm^2
(この数値となる係数は 1.76)

となっている。これは、

1. 火球の熱エネルギーすべてが熱線の被害を与えるわけではなく、上昇する火球に残りキノコ雲の傘を熱する残量
2. 20 km という距離になると、さすがに空気を透明とみなすこともできなくなるので、30% 程度の減衰

などを考慮に入れた（おそらく実験に基づく）数値と思われる。

ここでは、単純化した状況での計算式を導きたいので、一応、 2.7 cal/cm^2 という係数を採用しておくこととする。

太陽光との比較

計算例 9 で 16 kt(TNT) の核爆発の爆心点から距離 2 km の地点で受ける熱線は約 10 cal/cm^2 という結果を得ているのだが、それでは、この 10 cal/cm^2 という照射量は大きなエネルギーと言えるのだろうか。

もちろん、これは致命的に危険な照射量であり、皮膚表面の炭化を伴う火傷を生じさせる熱量である。しかし、実は普通の太陽光線からでも、5 分から数 10 分程度の時間で、この位の熱量を浴びている。その意味では、「大きなエネルギー」とは言い難い。

危険か否かを分ける要因は、「どのくらいの時間でその熱量を受け取るか」の違いであり、

僅かの時間で火球が熱量の大部分を照射し尽くす

ということが、核爆発の熱線を危険なものにする仕掛けとなっている。

ただし、逆に考えれば、太陽光線そのものが危険な量の熱量を照射しているとも言える。地上の生き物がバンパイアのような凄絶な結果を招くことなしに日差しを

浴びて歩くことができるのは、太陽光線から吸収する熱量を効率よく体内に（及び気化熱により体外に）分散させるようにできているからなのだろう。

それでも、太陽が同じ強度で照射を続けるのではなく、10分間に1回、1秒間のパルスにまとめて間欠泉のような照射をしているならば、エネルギーの総量に変化はないにもかかわらず、もはや、日中に屋外に出ることは人間にとっても命取りとなる。

火球

以上、熱線の総量（時間的総量）については、35%という数値と「球面に等分配される」ということを前提として、簡単に計算することが出来た。本来これが危険な照射量なのか否かは、その照射を浴びる時間に依存するのだが、核爆発では、程度の差はあるにしても短時間で熱線の総量を浴びるので、この総量で危険性の程度を評価することができる。

それでも、熱線の強度が時間と共に変化する様子を理解し計算するためには、また、なぜ短時間で照射が完結するのかということを理解するためには、火球というもののメカニズムを知ることが不可欠になる。

通常の燃焼で生じる火球の大部分は、燃焼の結果生じた「燃えかす」（ガス）であり、これはイメージしやすい。一方、核爆発の火球は、熱せられた空気により作られている。問題は、「どのようなプロセスで熱せられたのか」ということなのだが、これにはかなり長々した説明が必要になる。

そこで、火球がどのように発生し成長するかというプロセスはひとまず置いておき、火球の直径と表面温度を所与として、熱線の瞬間的強度を求めてみよう。火球表面から輻射される熱線の強度は、「黒体輻射モデル」として求めているのだが、これについても簡単に説明する。

3.2 熱輻射の瞬間的強度

3.2.1 仮定

以下の仮定をすることが妥当であるとして、計算を進める。

1. 火球は地表に触れない位置にあり、球体であると仮定する。
2. 火球表面は等しい温度であると仮定する。

3. 火球と対象地点の間の空気は透明であると仮定し、熱線の吸収や散乱は無視する。また、雲による反射等も無視する。

熱照射の総量を計算する場合には爆心点からの斜距離が問題であったが、熱照射の瞬間的強度を計算する場合には、

火球の半径と爆心点からの斜距離の比

が問題になる。

これは、

1. 火球半径を半径とする球面の上に小さな図形を貼っておき、
2. 中心は同じで半径は斜距離の球面をスクリーンとして、
3. 中心に光源を置いて図形をスクリーンに投影すると、
4. 火球半径と斜距離の比を相似比として拡大された図形がスクリーンに映る

ということから分かる。

火球表面の小さな部分から輻射される瞬間的な（例えば 0.01 秒間での）エネルギーが、

火球半径 : 斜距離

の比で拡大された部分に照射されるので、強度は面積比に逆比例して小さくなる。

remark. ここでは、爆心点は核爆発の起こった空中の点を意味し、その直下の地点（グラウンドゼロ）のことではない。斜距離は、その空中の点と地上の地点（照射の強度を計算しようとしている地点）との距離なのだが、グラウンドゼロ付近という生存不可能な地域を除けば、爆心点の見かけの高度はそれ程高くない。したがって、斜距離と、グラウンドゼロからの（地図上の）距離とを区別しなくても、（比率として）大きな違いはない。

3.2.2 黒体輻射モデル

ここから、黒体輻射といいういかにも難しげな単語が頻出する。それでは、黒体輻射の物理は難解なのかというと、残念ながら、本当に難解である。物理学の教科書では、黒体輻射は前期量子論の解説で登場することが多いが、だいたいにおいて前期量子論は「シュレディンガー方程式の解法」に象徴される「量子力学」より難しい。

確かに黒体輻射を理解することは難しい。しかし、それは「理解しようとするから難しい」のであり、実は、

この現象は黒体輻射モデルで解析できる

ということを前提として、黒体輻射の計算をするだけならば、難しいことはない。
それでは、計算をしてみることにしよう。

火球を「黒体輻射モデル」に従うと考えると、

温度が T の火球の表面 1 cm^2 から単位時間あたりに輻射される熱線のエネルギー P_T は

$$P_T = 1.355 \times (T/1000)^4 \quad \text{cal/sec} \quad (3.1)$$

である。これを「与えられた公式」として仮定する。

まず、次の二点に注意しよう。

1. 「黒体輻射」では、表面のみから熱が輻射されると考える。
2. 温度 T は、摂氏ではなくケルビンで計っている。

まず、「黒体輻射」という言葉だが、「視力を奪い尽くす白色火球」を「黒体」とは納得がいかないと思う。「黒体」という意味は、温度が低いとき「黒い」ということであり、温度が高くなれば、また別の話である。しかし、そう言った所で分かるわけではなく（そもそも、低温の空気は黒くなく透明だ），要するに「難しい物理学の話」なのだ。とりあえず、

- 火球内のすべての高温の空気が熱線を輻射するのだが、
- 「黒体」は「不透明」なので、火球表面からの輻射のみが外部に放たれる

と考えておこう。黒体輻射については、後でもう一度触れる。

次に、ケルビンという単位だが、これは、摂氏では「水が凍る温度」を 0°C としているのに対して、絶対零度 -273.15°C を 0 K (0 ケルビン) としているだけのものであり、常に摂氏よりも 273.15 だけ大きい値となる。ただ、火球にかかる大まかな概算をするときには、例えば 3000 K と $3000^{\circ}\text{C} = 2726.85\text{ K}$ の比はそれ程大きくないと考えて、摂氏とケルビンの区別をいい加減に使っても、それ程困ることは無い（もちろん、日常の生活で混同すると凍傷になったり燃えてしまったりする羽目になりそうだが）。その程度の概算をしているという意味では、 1.355 という係数を 1 と考えてしまっても良い。

3.2.3 4乗に比例という効果

重要なのは、4乗に比例するということである：

— 単位時間あたりの輻射 —

1000 K 単位で計った温度の4乗に比例する

この「4乗」という効果は、凄まじく、温度が2倍になると輻射強度は16倍になる。下の表は、温度が 1000 K から 2000 K , 4000 K , 8000 K と2倍に上昇して行くときの輻射強度の増加の様子を示している。温度が例えば 1000 K から 8000 K まで8倍に上昇すると、強度は $8^4 = 4096$ 倍上昇している。

$1,000\text{ K} (= 726.85^{\circ}\text{C})$	では	1.36	$\text{cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
$2,000\text{ K} (= 1726.85^{\circ}\text{C})$	では	21.68	$\text{cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
$4,000\text{ K} (= 3726.85^{\circ}\text{C})$	では	346.88	$\text{cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
$8,000\text{ K} (= 7726.85^{\circ}\text{C})$	では	5550.08	$\text{cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

remark. 前に、 cal/cm^2 , km/sec といった表記を使ったが、これは、それぞれ、 cal cm^{-2} , km sec^{-1} と書いても良い。 $\text{cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ は、

火球表面から放たれる熱線のカロリー、ただし、 1 cm^2 あたりで、かつ、
 1 sec あたりのカロリー

であることを表している。このような単位表示に遭遇すると、慣れないうちは威嚇的な印象を受けるものだが、慣れてしまえば使い勝手は良い。

remark. 黒体輻射の公式 (3.1) も、本来は、 1 cm^2 あたりの輻射強度の式として

$$1.355 \times (T/1000)^4 \quad \text{cal sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

の形で与える方が良く、さらに、温度の単位 K も単位表示に組み込んで

$$1.355 \times (T/1000)^4 \quad \text{cal sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} K^{-4}$$

とすべき（なのだが、いかにも難しそう）。

計算例 11. 3000°C の火球表面 1 cm^2 から 0.2 秒間に放たれる熱線のエネルギーは約 31 cal .

1. まず、温度をケルビンに変換すると

$$3000 + 273.15 = 3273.15 \text{ K} (= 3.27315 \times 1000 \text{ K})$$

2. この火球表面 1 cm^2 から 1 sec に輻射される熱線のエネルギーは、黒体輻射の式により

$$1.355 \times (3.27315)^4 = 1.355 \times 114.78 = 155.525 \text{ cal}$$

3. したがって、 0.2 秒間に放たれるエネルギーは

$$155.525 \times 0.2 = 31.105 \text{ cal}$$

参考として、同じ計算を

$$1.355 \times (T/1000)^4 \quad [\text{cal sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} K^{-4}]$$

の形で繰り返してみよう（単位記号は括弧付きにした方が読みやすい）。この場合、それぞれの単位をつけた数値を代入する。計算が進むに従って、単位の記号が、文字式の計算のように打ち消し合って消えていく：

1. まず、温度をケルビンに変換すると

$$3000 + 273.15 = 3.27315 \times 1000 \text{ K}$$

2. この火球表面から輻射される熱輻射の強度は、黒体輻射の式により

$$1.355 \times (3.27315 \text{ K})^4 \quad [\text{cal sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} K^{-4}] \\ = 155.525 \quad [\text{cal sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}]$$

3. 0.2 秒間に放たれるエネルギーは

$$155.525 \times 0.2 \text{ sec} \quad [\text{cal sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}] = 31.105 \quad [\text{cal cm}^{-2}]$$

4. 1 cm^2 からの輻射なので

$$31.105 \times 1 \text{ cm}^2 \quad [\text{cal cm}^{-2}] = 31.105 \quad [\text{cal}]$$

remark. このスタイルの計算は魅力的だが、式の最後の単位記号と式のなかに現れる単位記号の取り扱いが、どことなく不明確である。そこで、式の係数（黒体輻射の公式では 1.355）に単位記号をつけてしまうことになると、すっきりした「代数的」計算が可能になる。

remark. いずれのスタイルを選ぶにせよ、この計算例の計算では、有効数字についての扱いはいい加減なものである。黒体輻射モデルと現実の火球との相違を考慮して評価をするならば、有効桁はもっと小さい。ただ、有効数字についてきちんと考察して「正しく」計算するよりも、関数電卓を片手に闇雲に数値を打ち込んでしまう方が、神経を使わずに疲れないのだ。逆説的だが、

10 の数を数えて規模を評価する

という立場に立っているからこそ、

必要以上に精度の高そうな計算をしてしまっても構わない

ということなのだが、常に

実際の有効桁は低い

ということは意識しておくべき。

3.2.4 計算例

熱線の瞬間的強度

ここまで、火球表面から輻射される熱線の強度を計算してきた。つぎに、斜距離を与えて、その地点で受ける熱線の強度を計算してみる。これは、火球半径と斜距離の比の2乗に反比例するということから、すぐに求めることができる（空気による吸収や散乱を無視するという仮定の下でだが）。

計算例 12. 爆心点から斜距離で 1 km 離れた地点において、表面温度が 3000 °C で直径が 800 m の火球から、0.2 秒間で受ける 1 cm² あたりの熱量は 4.8 cal.

火球の半径は 400 m なので、半径 1000 m の球面との面積比の値は

$$\left(\frac{400}{1000}\right)^2 = 0.16$$

である。熱線の強度もこの値で弱まるので、求める値は、上の計算例で求めた値（ただし、31.105 cal ではなく、30 cal としておこう）を用いて

$$30 \times 0.16 = 4.8 \text{ cal}$$

remark. この計算例での「1 cm² あたりの」という意味は、「爆心点の方向に直交する表面 1 cm² あたりの」ということである。また、0.2 秒間に火球表面の温度が変わらないとして計算しているわけだが、実際には、温度は低くなり、火球の半径は大きくなる。

核爆発直後のデブリの温度は、8000 K などというものではなく、遙かに高い。次の計算例は、このような火球が成長する初期の状態についての計算なのだが、実は間違っている。

計算例 13. 爆心点から斜距離で 2 km 離れた地点において、表面温度が 1×10^6 K で半径が 1 m の火球から、0.2 秒間で受ける 1 cm² 当たりの熱量（熱エネルギー）を求める。

黒体輻射の公式により火球表面 1 cm^2 から放たれる熱エネルギーは、1秒あたり

$$1.355 \times \left(\frac{T}{1000} \right)^4 = 1.355 \times (10^6 / 10^3)^4 = 1.355 \times 10^{12} \text{ cal}$$

距離の比は $1 : (2 \times 10^3)$ であり、0.2秒間なので

$$\frac{1.355 \times 10^{12}}{(2 \times 10^3)^2} \times 0.2 = 6.775 \times 10^4 = 67750 \text{ cal}$$

しかし、この計算は、以下の点で「公式を使える状況の枠外」である：

- まず、このような高温の状態は0.2秒も続かない。黒体輻射の公式は、瞬間の強度を1秒間に換算した数値について述べているのであり、例えば 10^{-4} sec で輻射されるエネルギーを 10^4 倍して「1秒あたりの」としているだけのこと。半径が数百メートルの火球からの輻射ならば、1秒間の輻射で火球の温度はそれ程低下しないので、「1秒あたりの」と「1秒間での」の違いは大きくないだが、ここで設定では、火球の温度は急速に低下するはず。
- それ以上に深刻な間違いは、黒体輻射モデルで輻射される「熱線」の波長を考慮していないことだ。実は、このような高温の「黒体」から輻射される「熱線」は、いわゆる放射線に近い波長の光であり、わずかの距離でほとんど空気に入吸收されてしまう（これが火球が生成され成長していくメカニズムとなる）。

波長まで考慮に入れての黒体輻射モデルと、波長と空気による吸収率については後で扱うこととする。

「瞬間の」を「1秒あたりの」に換算する考え方だが、これを正確に言い表そうとすると、微分方程式の考え方に行き着く。概算をしている限りでは微分方程式は必要ないのだが、その代わりに、「使える状況なのか」という判断が必要になる。

その他の計算例：核の冬（？）

これは、核爆発よりも更に規模の大きな現象についての、「10の個数を数える」練習である。必要なデータはすべて与えられているので、後は黒体輻射の式に当てはめて計算するだけである。ただし、核爆発の問題とは直接の関連はないので、無視しても良い。

計算例 14. 表面温度が 5778 K で直径が $1.391 \times 10^6\text{ km}$ の「火球」から $1.496 \times 10^8\text{ km}$ 離れた地点 A で、1 秒間に受ける 1 m^2 あたりの熱量は 326.37 cal .

1. 黒体輻射の公式 (3.1) を用いて、 $5.778 \times 10^3\text{ K}$ の「火球」表面 1 cm^2 からの瞬間的輻射を計算すると、

$$1.355 \times (5.778)^4 = 1.355 \times 1114.58 = 1.51 \times 10^3\text{ cal sec}^{-1}$$

2. 1 m^2 あたりの熱量を求ることになるので、「火球」表面からの輻射についても、 1 cm^2 ではなく 1 m^2 からの瞬間的輻射に直す。 $1\text{ m} = 10^2\text{ cm}$, $1\text{ m}^2 = (10^2)^2 = 10^4\text{ cm}^2$ なので、 10^4 をかけば良い：

$$1.51 \times 10^3 \times 10^4 = 1.51 \times 10^7\text{ cal sec}^{-1}$$

3. 「火球」の半径 $1.391 \times 10^6 \div 2 = 6.955 \times 10^5\text{ km}$ と、地点 A から「火球」中心までの距離 $1.496 \times 10^8\text{ km}$ との比は

$$6.955 \times 10^5 \div (1.496 \times 10^8) = 4.649 \times 10^{-3}$$

であり、

4. 比の値 4.649×10^{-3} の 2 乗は、 2.1614×10^{-5}

5. 火球表面からの輻射 $1.51 \times 10^7\text{ cal sec}^{-1}$ はこの値で減衰するので、求める値は

$$(1.51 \times 10^7) \times (2.1614 \times 10^{-5}) = 326.37\text{ cal sec}^{-1}$$

これは、太陽から地球が受けるエネルギーの計算になっている。ここではカロリーで求めているが

1. 4.184 をかけてジュール (J) に換算すれば、

$$1366\text{ J/sec}$$

が得られ、

2. 1 秒あたり 1 J のエネルギーは 1 ワット (W) であり、この単位を使うと

$$1366\text{ W}$$

3. さらに, 1 m^2 あたりであることを表記して

$$\text{太陽定数 } 1366 \text{ W/m}^2$$

が得られる。

remark. 「火球」から $1.496 \times 10^8 \text{ km}$ 離れた地点 A , と言うときの $1.496 \times 10^8 \text{ km}$ は、「火球中心」までの距離ではなく「火球表面」までの距離とも解釈できる, と言われば, その通りである。しかし, 半径に比べて距離は 5000 倍近くあるので, どちらでもあまり変わらない。

計算例 15. 地球から大気を取り除き（もしくは雲による反射や温室効果を無視して），地球表面の反射（例えば氷原の反射）を無視し，地熱なども無視して，地球の黒体輻射と太陽から受ける熱量が釣り合うような地球の温度を求める

-
1. 注意しなければいけない点は, 太陽からの光は地球の断面積で受けるが地球からの輻射は全地表面積から放たれるということである。断面積と表面積の比

$$\pi R^2 : 4\pi R^2 = 1 : 4$$

なので, 地球は, 太陽光を受ける 4 倍の面積から熱を輻射していることになる。

2. 太陽からは, 1 m^2 当たり 326.37 cal/sec の熱量を受け取るので, 地球表面 1 m^2 当たり

$$326.37 \div 4 = 81.59 \text{ cal/sec}$$

の輻射となる温度でバランスがとれる。

3. この値は 1 m^2 あたりの値なので, 1 cm^2 あたりに直すと

$$81.59 \times 10^{-4} \text{ cal/sec}$$

であり,

4. 黒体輻射の公式 (3.1) により

$$1.355 \times (T/1000)^4 = 8.159 \times 10^{-3} \quad (3.2)$$

となる温度 T でバランスがとれることになる。

5. この値は

$$(8.159 \times 10^{-3}) \div 1.355 = 6.0214 \times 10^{-3}$$

の 4 乗根を関数電卓で計算して

$$T/1000 = 0.27856, \quad T = 278.56 \text{ K}$$

6. 絶対零度の値 $273.15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ を引いて摂氏に直すと

$$278.58 - 273.15 = 5.41 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

つまり、地球はかなり寒いはずなのである。さらに、アルベド (albedo, 宇宙から見た地球の白さを表す定数で、氷、雲などの反射を表す) として 0.3 程度の値を設定すると、等式 (3.2) の右辺は 0.7 倍され、したがって、左辺の T は

$$0.7^{1/4} = 0.9147$$

をかけた値、

$$278.58 \times 0.9147 = 254.81 \text{ K} = -18.34 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

となり、極寒の地球となる（その結果、氷に覆われた面積は更に増え、反射により失われる太陽光は更に増加する）。

地球が比較的温暖な理由は、主に温室効果によるものであり、基本的には温室効果はありがたいものなのだ。

逆に言えば、温室効果の威力はかなりのものなのであり、その変動が与える影響は無視しがたい。太陽光と（黒体としての）地球のバランスは、そのバランスを崩す要因を打ち消す方向に働く（negative feedback として働く）のだが、アルベドと温室効果は、むしろバランスの崩れを拡大する方向に働く（温暖化による海中メタンハイグレードの自然放出など）ことに注意すべきである。

一方、大規模核戦争による「核の冬」については、過大評価ではないかと思う。

もちろん、大規模核戦争の結果、多数の都市火災が発生して粉塵が太陽光を遮り気温が低下するという影響はとてもなく大きいのだが、それ以前に発生する、核

爆発による死者と、生産輸送手段が壊滅することによる死者があまりにも膨大なので、それに比較するならば、気温低下の影響は過大評価ということになると思う。

後に述べるように、核爆発のキノコ雲により高高度まで到達する粉塵と、その後の大規模火災による粉塵は別のものであり、後者は比較的速やかに地上に降下し、長期的影響を与えとは考えづらい。また、これまでにも自然に発生している森林火災や火山噴火（ピナツボ火山レベル）に比較しても、桁違いのものとは思えず、少なくともカルデラ噴火の影響よりも小さいことは確実ではないだろうか。

一方、大規模核戦争による生産輸送を初めとする「文明を支える基礎」の破壊の影響は、おそらく途方もなく大きく、現代の「肥料等の科学技術により無理矢理維持している人口」は劇的に減少することになり、十兆人単位での人口減少をもたらすことになるのではないだろうか。

第4章 火球

この章「火球」と次の章「黒体輻射」では、火球についての少し立ち入った話に踏み込む。1つの選択は、これら2つの章を飛ばして、「ガンマ線の遮蔽」、「ショック・ウェーブと爆風」、「残留放射線」のいずれかの章に進むことである。飛ばしたために説明不足の点も出てくるが、このようなテーマでは一歩ずつ確実に理解して進むよりも、分かったことにして先に進む姿勢の方が有効である。その方針で乗り切ることにすれば、なんとかなると思う。

もうひとつの選択、つまり章の順番通りに進むという選択では、1点だけ気をつけなければならない点がある。それは、

難しそうな用語が頻出し、ふんだんな予備知識が要求されそう

という見かけに惑わされないことだ。確かに、本当に理解して公式を使おうと考え始めると、かなり難しい。また、ここでの説明が不正確であることに気づき修正しようとすると、かなり大変な思いをするはずだ（簡単な間違いを修正するだけ、というミスもあるとは思うが）。

一方、公式を受け入れて使うことにしてしまえば、簡単な計算をするだけのこと。

それでは、火球の生成のメカニズムから始めよう。

4.1 火球の成長 1

4.1.1 透過性

火球の成長のメカニズムは「輻射の玉突き」である。その前に、輻射と言う言葉と、その透過性について説明が必要である。

電磁波

ラジオ波、マイクロ波、赤外線、可視光線、紫外線、エックス線、ガンマ線はすべて電磁波である。ラジオ波のような無害なものからガンマ線までの違いは波長だ

けであり、紫外線の中で波長の短いもの（真空紫外線）辺りから、いわゆる「放射線」という危険なものになる。

ラジオ波であろうとガンマ線であろうと電磁波を放射しているのだが「放射しているのだから放射線」とまで割り切ってしまうと、オカルト的感性による「東京タワーは放射線を出している」と区別しがたい。

つまらない混乱は避けたいので、多少古めかしい言葉だが、「放射する」という言葉の代わりに「輻射する」という言葉を用いることにし、「放射線」という言葉は「電離放射線」（これが日常用語での放射線に相当する）に限って使うことにしている。

いわゆる放射線が「電離」放射線と呼ばれる理由、また、それが生き物にとってなぜ危険であるかという理由については、今は触れない。ここでのテーマは火球の生成プロセスであり、必要なことは、電磁波の透過性についての、以下で説明する事実だけである（これは事実というのはおこがましい程に簡略された「事実」なのだが、火球の生成を説明するためには、これで十分だと思う）。

remark. 電磁波の中で、「電離」という危険性をもつものは「電離放射線」として明確に定義される。一方、「熱エネルギーを放つ」という点に注目している場合には「熱線」、「熱輻射」という言葉を使うが、これは特に定義が在るわけではない。

量子力学的世界ならではの、不思議な「理解」から始める。

最大の混乱要因

まず、

電磁波は、（名前から分かることおり）波動なのだが、同時に光子という名の粒子とも考えられる

という混乱要因が登場する。つまり、

電磁波である

ということを、

光子（フォトン）である

と言い換えることができる。

しかも、怪しからんことに、

1. 波なので,

- (a) 波長と,
- (b) 波としてのエネルギー（波の振幅から決まる）

をもつ。

2. 粒子なので

- (a) 一粒の粒子のエネルギーと,
 - (b) それに粒子の個数をかけたものとしての全体のエネルギー
- をもつ。

3. 波としての描写と粒子としての描写の関係は,

- (a) 波長とエネルギー（粒子一粒のエネルギー）は、反比例の関係にあり，
- (b) 波としてのエネルギーは、粒子一粒当たりのエネルギーに個数をかけたものと等しい。

まったくもって、怪しからん話なのだが、これはボーアを筆頭とする超一流の物理学者が何年にもわたって悩んだあげくに辿り着いた（諦めの）境地なので、受け入れるしかない。量子力学とは、そのようなものなのだろう。

これさえ受け入れてしまえば、後は波長と（粒子の）エネルギーが反比例の関係にあり、例えば、

1. 「波長が長い」は

2. 「エネルギーが弱い」

ことであり

1. 「波長が短い」は

2. 「エネルギーが高い」

ことだという言い換えに慣れるだけで良い。

ただし、それぞれの現象での電磁波の振る舞いを想像する場合には、波としてイメージしたほうが考えやすい場合と、粒子としてイメージした方が考えやすい場合がある。

電磁波の透過性

1. 真空紫外線（と呼ばれる、紫外線のなかでも波長の短い紫外線）あたりを境として、それよりも波長の短い電磁波（粒子としてのエネルギーが高い電磁波）を電離放射線という。つまり、（極端に波長の短い紫外線と）エックス線、ガンマ線を電離放射線という。これが、いわゆる「放射線」である。
2. 電離放射線は、光子という粒子と考えると理解しやすい。
3. エネルギーの単位は、電子ボルトという単位（記号は eV）であり、
 - (a) 1000 電子ボルトを表す単位を keV，つまり， $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$
 - (b) 百万電子ボルトを表す単位を MeV，つまり， $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$と定める。
4. 電離放射線は 10 eV 以上のエネルギーを持つ光子の輻射である。また、核爆発に絡む放射線は、大部分は 100 MeV 以下のエネルギーである。
5. 電離放射線は、エネルギーが高いほど（つまり波長が短いほど）空気中の透過性が強い。
6. 一方、電離放射線より（光子としての）エネルギーの低い輻射は、波と考える方が理解しやすい。言い換えると、電離放射線より波長の長い（光子の）輻射は、波と考える方が理解しやすい。いずれにせよ、波と考えるのだから、「光子の」と言わずに単に輻射と言った方が良い。
7. 紫外線、特に真空紫外線は空気中の透過性が極めて悪いが、波長が長くなるに従って透過性は良くなり、可視光線辺りの波長になると、空気中の透過性は非常に良い（高いエネルギーのガンマ線に比べても、空気中の透過性は良い）。
8. なお、可視光線の透過性が良いのは常温の空気であり、高温の空気となると透過性は悪くなる（橙色に光る高熱の空気は透明ではない、という気分）。

ガンマ線もエックス線も、「貫通力が高い」というイメージがあると思う。確かにその通りであり、不透明なものに対しては、可視光線よりも遙かに透過性が良い。しかし、これは可視光線の透過性が「選り好みが強い」ためであり、透明・不透明という違い自身、可視光線の「選り好み」に依るものなのだ。空気という「透明」な媒質中では、可視光線の方が大抵のガンマ線よりも透過性が良い。さらにガンマ線

より（光子一粒あたりの）エネルギーが低いエックス線となると、特に火球の成長に絡むエネルギーの低いエックス線となると、透過性は極めて低い。

remark. 波長とエネルギーは反比例の関係にあると言つただけ式は提示しなかつたが、もちろん、反比例の係数を与えて計算する式も存在する。また、電子ボルトというエネルギーの単位を、ジュールに換算することもできる。しかし、火球の生成に関する限り、そこまでは必要ないので、そのような計算は保留した。反比例については、言葉の問題と受け取れば良く、電子ボルトも「何かそのような単位」というだけで良い。

4.1.2 デブリ

いわゆる「原爆」であろうと、また、もっと強力な「水爆」であろうと、また、大気中の爆発であろうと、水中の爆発であろうと地中の爆発であろうと、如何なる場合であっても核爆発のエネルギーの大部分はデブリ、つまり、核兵器の筐体・燃焼済みの火薬・タンパー・反応済みの核燃料などの残骸に吸収され、デブリは超高温（数千万度）・超高压（百万気圧以上）のガスになる。この超高温のデブリが生成されるまでのメカニズムはひとまず置いておき、このデブリがすでに生成されたとして、それから後のプロセスについて述べる。

ここからどのようにエネルギーを放出して行くかについては、地中・水中・地表面・大気中・高高度の大気中・真空と見なせる高高度と、デブリの周囲の状態により異なる。

4.1.3 火球の成長・概略

高温の物質は、熱線を放つ。例えば、電気ストーブに手を近づけると、手のひらに輻射熱を感じる。これが「あたたかい空気」に依るものでないことは、ストーブと手のひらの間を紙で遮ってみると分かる。核爆発の火球は、最初は輻射熱により成長し、それから輻射熱により広い範囲を焼き尽くす。

それでは、通常の高さの大気中の核爆発について、デブリから火球が成長していくメカニズムを追跡してみよう。

空気中の爆発であり周囲を岩石等の堅い物質で囲まれている訳ではないので、「超高压」のガスである以上、ガス状のデブリは「爆発」する。この「流体力学的効果」は当然存在し、重要なのが、火球の生成初期の段階では、この超高压ガスが発生させる「流体力学的効果」よりも速く、「輻射の玉突き」により火球が拡大して行く。

この「輻射の玉突き」のメカニズムは

1. 黒体輻射モデルからもわかるように、瞬間的熱輻射の強度は温度の4乗に比例する。
2. 初期のデブリは数千万度という高温であり、瞬間的熱輻射の強度は途方もなく大きい。したがって、これから述べる「超高温」のもたらす「輻射の玉突き」は、「超高压」による「流体力学的効果（爆発）」よりも早い時間スケールで進む。
3. 黒体輻射の波長についてはまだ説明していないのだが、初期の数千万度という高温では、
 - (a) 輻射される「熱線」の波長はエックス線の波長である。
 - (b) そのエックス線は、（光子としての）エネルギーがあまり高くないエックス線であり、空气中では短距離（数センチ以下）でほとんど吸収される。
4. したがって、極めて短時間でデブリの周囲の空気は超高温に加熱され、そこから再び熱線を輻射する。
5. この火球（デブリとその周囲数センチの空気）は超高温なので、そこから放たれる「熱線」の波長は、依然として空气中でほとんど吸収されてしまう波長であり、
6. したがって、極めて短時間でデブリの周囲の空気は超高温に加熱され、そこから再び熱線を輻射する。
7. この火球（少し大きくなっている）は超高温なので、……以下、この過程の繰り返し

という「輻射の玉突き」であり、周囲の空気を加熱しながら、火球は成長して行く。

当然のことだが、「超高压」の発生させる高速の衝撃波は、成長して拡がって行く火球表面を追いかけるのだが、しばらくの間は追いつくことが出来ない。また、火球は高温の空気なので急速に膨張し、火球表面からも衝撃波が発生する。しかし、最初は火球の拡がる速さに追いつくことは出来ず、火球内部に取り残される。火球は、あたかも空気が静止したまま加熱され火球となって拡がっていくかのように、成長を続ける（内部では衝撃波が火球表面を追いかけているのだが）。

しかし、火球が拡大して行くに伴って、「超高温」を分配する空気の量も増加し、温度は下がって行く。結果として、「輻射の玉突き」による火球の成長速度も鈍くなり、内部から追いかけてきた衝撃波や火球表面が発生させてきた衝撃波に追いつかれ、逆に、それらの衝撃波は火球を離れ拡がっていくことになる。

さらに火球の温度が低下すると、輻射される「熱線」は可視光線の領域になり、空気中で吸収されることなしに遠距離まで届くようになり、周囲を焼き尽くす熱線としてエネルギーを放出しながら上昇し、形は崩れて「キノコ雲の傘」となって行く。

4.2 火球の成長（特徴的時間）

核分裂に限らず核融合を用いた場合にせよ、また、さらに、「核融合で発生する中性子が引き起こす核分裂」を付け加えた場合にせよ、多くのエネルギーは核兵器の残骸（デブリ）に吸収され、超高温・超高压のデブリを生成する。空気中の核爆発では、このデブリから火球とショック・ウェーブ（衝撃波）が生成される。

remark. 衝撃波と言わずにショック・ウェーブと呼び方を変えたが、これは気分の問題である。通常、衝撃波は一瞬の「衝撃」なのだが、核爆発の衝撃波はそれなりの幅を持ち持続する高压の爆風として観察される。通常の爆発の衝撃波が「高波」ならば、核爆発の場合のそれは「津波のような厚みを持つ高波」なので、カタカナ語にしてみた（同じことなのだが）。

特徴的な時間

それでは、火球が成長しショック・ウェーブが離れていく様子を、便宜的に t_1 から t_5 までの特徴的な時間を区切りに選んで見てみよう (GD 64-70)。タイムスケールを把握しやすくするために、時間の単位は msec (ミリセカンド、千分の一秒) に統一しておく。

$t = t_1$: 超高温のデブリ 爆発から $t_1 = 0.001$ msec 経過

デブリは核爆発のエネルギーの大部分を吸収し、数千万度の超高温ガスになる。 t_1 から t_2 までの間に、次のプロセスで火球は成長する：

1. デブリは、その高熱をエックス線として輻射し、エックス線の玉突きにより火球は急速に成長する。
2. デブリは百万気圧を超す高圧なので、火球の内部でショック・ウェーブを発生させ、この「内部ショック・ウェーブ」は遠ざかる火球表面を追いかける。
3. 火球の成長速度が余りにも速いので、火球内の熱せられた空気が膨張することによるショック・ウェーブもそれに追いつかず、火球はその半径の内部にもともとあった空気のほとんどを取り込み、
4. 火球が大きくなるにしたがって、より多くの空気が熱エネルギーを引き受けることになるので、火球の温度は低下して行く。
5. 火球の温度が低下すると、周囲の空気を加熱する火球表面からの輻射は弱まって来る。結果として、火球表面が中心から遠ざかって行く速度は低下する。

$t = t_2$: ショックフロントの発生 20 kt(TNT) の場合、約 0.1 msec :

火球の温度が 30 万度辺りまで低下すると、火球内の熱せられた空気の膨張（によるショック・ウェーブ）が遠ざかる火球表面に追いつき、火球表面にショック・ウェーブを発生させる (hydrodynamic separation)。

1. 更に、それに（初期に発生した）内部ショック・ウェーブが追いつき、合成されたショック・ウェーブが発生する。
2. ショック・ウェーブは火球から離れ始める（これが時刻 t_2 であり、以下は、ここから t_3 まで）。
3. ショック・ウェーブは高温・高圧であるため不透明であり、ショック・ウェーブ内部の火球表面からの輻射を遮る。
4. そのため、外側から観ると、ショック・ウェーブの温度が見かけの温度となる。
5. ショック・ウェーブは火球から離れると火球内部からの熱の供給を受けないので、温度は急速に低下する。結果として、ショック・ウェーブの半径が増加するにしたがって火球の見かけの温度は低下し、

$t = t_3 = t_{\min}$: 見かけの温度が極小 20 kt(TNT) の場合, 約 15 msec
火球の見かけの温度は極小値 (約 3,000 度) をとる。

1. 火球から離れていくショック・ウェーブが観察され (break away),
2. ショック・ウェーブの温度が低下したためにショック・ウェーブが「透明」になって行く効果により, 内部の火球が再び「見える」ようになって行き, 見かけの温度は上昇し,

$t = t_4 = t_{\max}$: t_{\min} 後の極大 20 kt(TNT) の場合, 約 150 msec
火球の見かけの温度は t_{\min} 後の最大値 (約 8,000 度) をとる。そこから

1. 火球からの輻射は可視光線から赤外線までの波長になるので, 周囲の空気_ADDRESS_に吸収されることなしに遠くまで届くようになり, ゆっくりと熱エネルギーを失っていく。
2. 火球は高温なため高圧であり, 周囲の空気の大気圧に抗して「ゆっくりと」膨らんで行くが, そのために火球内部の空気は希薄になり, 火球には浮力が働き上昇する。

$t = t_5 = t_{80\%}$: 熱エネルギーの 80% の熱を輻射。20 kt(TNT) の場合, 約 1,500 msec

1. t_5 までで, 火球はその熱エネルギーの 80% を輻射し終える。
2. ここからも火球は熱線を輻射しながら上昇して行き (メガトン級の核爆発では秒速 150 m を上回る速度), 上空に遠ざかり熱線の脅威は終わる。

ショック・ウェーブが離れていくことに伴う, 見かけの温度の低下と回復の説明は,
火球表面から離れて行くショック・ウェーブを構成していた高熱の空気
は, 火球から少し離れることができるだけで, そこに置き去りにされる。
遠くに拡がって行くショック・ウェーブは, (日本に到達したチリ津波に
含まれる海水が南米から旅をしてきたわけではないことと同じく) 遠く
の空気により構成される

ということを考慮すると, 実は, 無茶な説明ではある。しかし, この程度で良いのだと思う。大切なことは,

核爆発の閃光は, 一瞬弱くなった後に, 再び強烈な熱線を放つ

という「ダブルピーク」が生じることを、納得することである。

どうしても、もう少しまともな説明を、と言うのであれば次のような描写になる：

火球「表面」と言っても、不連続な表面があるわけではなく、実際には等温の火球本体の「輪郭をぼかす部分」(温度勾配)が取り囲んでいる。しかし、この「ぼかし」の厚みは薄いので、それが透過性が低く火球本体より温度が低い空気で構成されても、比較的影響は少ない。しかし、

1. ショック・ウェーブが火球表面から離れていくことに伴って、火球本体の周りを取り囲む「ぼかしの部分」の厚みが増す(ショック・ウェーブとして火球表面から離れて、火球近くに取り残された高熱の空気が、厚みのある「ぼかしの部分」となる)
2. この「ぼかしの部分」は透明性が低く、かつ、火球本体よりも温度が低いので、外から見た火球の見かけの温度は低下する
3. しかし、透過性が低いということは火球本体からの輻射される熱線を吸収するということであり
4. すぐに火球本体と同じ温度に熱せられ、「ぼかしの部分」は元の厚みに戻る(したがって、見かけの温度は元に戻る)

結論を言うと、

t_2 から t_4 までの、ダブルピークの間の現象は、とても複雑であり難しい

ということである。

remark. もうひとつの結論は、簡単な説明とそれよりは立ち入った説明とでは、現象の記述が逆になることもある、ということである。このような事態は避けるべきなのだが、それも、なかなか難しい。「不透明な衝撃波が冷えて透明になる」という潔い良いストーリーに比べて、「輪郭がぼけていると見かけの温度は低い」という中途半端なストーリーは……やはり、とことん中途半端なのである。いっそのこと微分方程式を建てて記述すればという気になるが、おそらく、現象はもっと複雑であり、現象をうまく記述する数式を得るには、テーラーを初めとする「現象としての物理に、膝の上の猫をなでまくるように親しんだ」名人たちの眼力が必要なのであろう。これは有り難すぎるので、なるべく簡単な描写を選ぶことにする。

2回の閃光

核爆発の閃光の特徴は、

1. 最初の一瞬の閃光
2. 火球の見かけの温度が 3000 度まで低下
3. 見かけの温度が 8000 度まで上昇した 2 度目の閃光

という 2 回のピークである。8000 度と 3000 度の比は

$$\frac{8000}{3000} = 2.66$$

でそれ程大きくないのだが、黒体輻射モデルとしての熱線の強度は

$$\left(\frac{8}{3}\right)^4 = \frac{4096}{81} = 50.56$$

であり、明確な二重ピークとして観察される。なお、計算しやすいように、温度はケルビンで測った温度としている (3000, 8000 という数値自身、かなり大まかな数値なので 273.15 の違いは無視しても良い)。

火球の大きさ

それぞれの時刻での火球の半径は、20 kt(TNT) の場合、

- t_2 で 10 m から 15 m
- t_{\min} で 90 m 程度

であり、そこからはゆっくりと 230 m 程度の最大半径まで膨らんで行く。

1 Mt(TNT) の核爆発ともなると火球の最大半径は 1 km を越える。この巨大な火球から輻射される熱総量は 20 km 離れていても皮膚に II 度の火傷を負わせるレベルになる。

ただし、「火球の最大半径」という概念は、かなり場当たり的なものであり、 t_2 , t_{\min} における半径ほど明確には定義されない。それは、火球というものが、

- 内部は等温で

- ほぼ不連続に温度が低下する「火球表面」を持つ

という条件を維持していないと、その半径という概念も作為的な定義が必要になるためである。 t_{\min} でも、すでに火球は等温ではなくなり境界もぼやけてはいるのだが、それでも、だいたいの大きさは定められる。しかし、最大半径が問題になる時点では、すでに球体としての形も崩れ境界もはっきりしなくなっているので、「最大半径（直径）」は測り方により（むしろ定義の仕方により）、かなりの相違が生じることになる。

火球の上昇

火球は浮力により上昇する。下からは爆心点に吹き込む破壊された破片をふんだんに含む「煙」が上昇しキノコ雲の足を作る。この時点での火球の膨張と上昇は、初期の成長過程に比べれば「ゆっくり」なのだが、とは言っても大気中に生じる現象としては極めて高速な変化なので、上空の空気に複雑な流れを発生させながら火球は上昇し、キノコ雲の「傘」となって拡がって行く。

「傘」の中には、高熱のドーナツ型の渦巻きが隠されている。キノコ雲の足の上昇気流はドーナツの穴に吹き込み、火球を構成していた高熱の空気はこれを巻き込みながら、ドーナツの穴に沿って上に進み外側で下に進む向きで旋回する。「傘」がどれくらいの大きさまで拡がるかは、残留放射性物質が降り注ぐ領域を決めるという意味で重要なのだが、様々な条件に依存し、また、複雑であり解析は難しい。

4.3 時間スケール

デブリが作られるまでの時間 t_1 は、核出力に依存しない。一方、 t_2 から熱線の輻射がほぼ終わる $t_5 = t_{80\%}$ までの時間（及びその時の火球の半径の数値）は、核出力が増加するにしたがって大きくなる。

例えば、 $t_5 = t_{80\%}$ は 1 Mt(TNT) の核爆発では約 8 秒であり、広島・長崎の場合の「ピカッ」と違って、熱線は「ギラーアーー」と時間をかけて焼き尽くすことになる。

時間が比較的長いということは、

核爆発が起こってからでも身を守る反応ができる

ということ、つまり「訓練が役に立つ」ということを意味する。ただし、やはり 8 秒間の最初の 1 秒でかなりの熱線を浴びるのであり、「訓練が役に立つ」という意味は「被害を減らせる」ということに留まる。

t_2 から t_5 までの時間スケールについては、計算式が知られている [ENW, pp 309]。

- W kt(TNT) の核爆発では

$$t_4 = t_{\max} = 0.0417 W^{0.44} \text{ sec}$$

- t_1 を除く特徴的時間は、核爆発の規模に依存しない係数で t_{\max} に比例する。

remark. 特徴的時間、特に t_2 から t_5 までの間に生じている現象は、簡単な数式で記述されるようなものとは思えない。また、 t_1 から t_2 まで（火球の成長）、 t_4 から t_5 まで（熱線を輻射することに依る減衰）も、異なるメカニズムによる現象である。それらの時間が t_{\max} に比例するという結論は、おそらく、「実験データにある程度あてはまる」という経験則なのだろう。また、 $W^{0.44}$ の「3 乗根 0.33 よりは大きく 2 乗根 0.5 よりは小さい微妙な数値 0.44」と係数 0.0417 も、実験データから当てはめたものではないだろうか（もしくは、なんらかのモデルとの兼ね合い？）。なお、爆心点の高度が高い場合は、この式を使うことはできない。その場合は、高度に依存した定数を持つ別の式を使わなければならないのだが、そこには $W^{0.44}$ という項は現れない。

ともかく、この計算式を使ってみよう。

上にあるように、20 kt(TNT) の場合では、

$$t_2 = 0.1 \text{ msec}, \quad t_3 = 15 \text{ msec}, \quad t_4 = 150 \text{ msec}, \quad t_5 = 1500 \text{ msec}$$

なので、核出力の規模によらず、これらの時間の比率は

$$\begin{aligned} t_2 : t_3 : t_4 : t_5 &= 0.1 : 15 : 150 : 1500 \\ &= 0.00067 : 0.1 : 1 : 10 \end{aligned}$$

となる。例えば、 $t_5 = t_{80\%}$ は t_{\min} の約 10 倍。

多くの場合、 t_1 は爆発の瞬間と同時と見なせる。また、 t_2 は爆発の瞬間とほぼ同時であり、また、現象そのものが周到な準備をして観測しない限りわからないものなので、観察が比較的容易な $t_3 = t_{\min}$, $t_4 = t_{\max}$, $t_5 = t_{80\%}$ について調べる：

$$t_{\min} : t_{\max} : t_{80\%} = 0.1 : 1 : 10$$

時間スケールに関する経験則をまとめておく：

- 核爆発の開始から,
 1. t_{\min} 最初の閃光に続く火球温度が極小となるまでの時間
 2. t_{\max} 再び火球の温度が極大になるまでの時間
 3. $t_{80\%}$ 火球が熱エネルギーの 80% を輻射するまでの時間
- $t_{\min} : t_{\max} : t_{80\%} = 0.1 : 1 : 10.$
- $W \text{ kt(TNT)}$ の核爆発では

$$t_{\max} = 0.0417 W^{0.44} \text{ sec}$$

核出力の計測

計算例 16. 1 kt(TNT), 20 kt(TNT), 500 kt(TNT), 1 Mt(TNT), 50 Mt(TNT) での t_{\max} の値は、それぞれ

$$\begin{aligned} 0.0417 \times 1^{0.44} &= 0.0417 \times 1 = 0.0417 \text{ sec} \\ 0.0417 \times 20^{0.44} &= 0.0417 \times 3.7360 = 0.155 \text{ sec} \\ 0.0417 \times 500^{0.44} &= 0.0417 \times 15.401 = 0.642 \text{ sec} \\ 0.0417 \times 1000^{0.44} &= 0.0417 \times 20.89 = 0.871 \text{ sec} \\ 0.0417 \times 50000^{0.44} &= 0.0417 \times 116.8 = 4.871 \text{ sec} \end{aligned}$$

となる。

この計算結果、及び $t_{80\%}$ が t_{\max} の約 10 倍という評価に基づくと、50 Mt(TNT) の核爆発では約 48 秒に渡って熱線に焼かれるということになるのだが、さすがにこの規模となると火球のサイズは余りにも大きく 80% の熱量を輻射するよりも早く火球は気圧の低い上空で拡がってしまい、また「キノコ雲の足」から巻き上げられてくる粉塵に覆われ、熱量の多くはキノコ雲の傘の中に残留することになるであろう。

また、この規模の核爆発となると大気層の厚みは相対的に薄く、また、地面からのショック・ウェーブの反射等の影響もあり、 $t_{\max} = 4.871 \text{ sec}$ という計算結果は、もはや公式の適用範囲を逸脱しているのかもしれない。

計算例 17. 核爆発の最初の閃光から 0.5 秒後に、熱輻射の 2 度目のピークが観測されたとする。このことから核出力を求めると（関数電卓が必要）

$$0.0417 \times W^{0.44} = 0.5$$

であることから

$$W = (0.5 \div 0.0417)^{1/0.44} = 11.99^{2.27} = 281.1$$

なので、核出力 W は約 280 kt(TNT) 程度と評価される。

1 kt(TNT) という小規模の核爆発であっても、 t_{\max} は 41.7 msec であり、この値は現代の電子機器が計測できる時間スケールから見れば、かなり遅い。したがって、安価な民生用機器でも（最初の閃光を捉える準備が出来ていれば） t_{\max} を測るのは容易な作業であろう。最初の閃光で器機をスタートさせ、輻射が一瞬弱くなり回復し始める時点をトリガーとして、次に輻射が増加から減少に転じる時点までの時間を測れば良い。これで t_{\min} から t_{\max} までの間隔が測定され、 t_{\min} は t_{\max} の 0.1 倍であることがわかっているので、後は 0.9 で割るだけである。

爆心点までの距離が分かっていれば輻射の強度から核出力を計算することもできるのだが、 t_{\min} と t_{\max} の間隔は爆心点からの距離と無関係に計測できる。これは、大きな利点となる。

熱エネルギーの放出

$t_{80\%}$ 以外にも、熱エネルギーの

20%, 50%, 70%

が放出されるまでの時間は、 t_{\max} との比で

$$t_{20\%} : t_{50\%} : t_{70\%} : t_{80\%} = 1 : 2.25 : 5.0 : 10$$

と与えられている [ENW, pp 311]。つまり、80% の放出が完了するまでには t_{\max} の 10 倍 という比較的長い時間が掛かるものの、50% は 2.25 倍の時間で放出し終わっているのであり、また、 t_{\max} の時点ですでに 20% は放出されているという訳だ。結論は、

- 大型の核爆発の場合、熱線は「ギラーラー」と対応可能な長さの時間で被害を与えるとは言うものの、
- やはり、最初のうちでかなりの熱量を受け取ってしまうのであり、
- 閃光を見てからの対応では、被害を軽減するという程度の効果しか期待できない

ということであろうか。

4.4 瞬間的強度

4.4.1 瞬間的強度の評価

火球からの輻射の瞬間的強度も、時間と共に変化するが、これについても、以下の比例関係が成り立つ [ENW, pp 309]。

- 核出力 W kt(TNT) の核爆発では、 t_{\max} における火球全体から放出される熱線の瞬間的強度は

$$P_{\max} = 3.18 W^{0.56} \text{ sec}^{-1}$$

- その他の特徴的時間における輻射強度は、核爆発の規模 W に依存しない係数で P_{\max} に比例する。

時間の比例関係と合わせて、

1 kt(TNT) の場合について、横軸に時間 t 、縦軸に瞬間的強度 P_t をとつてグラフをかくと、 W kt(TNT) の場合のグラフは、横軸を $W^{0.44}$ 、縦軸を $W^{0.56}$ に拡大したグラフとして得られる

ということである（このグラフは [ENW, pp 309] を参照）。

$$W^{0.44} \cdot W^{0.56} = W^{0.44+0.56} = W$$

となるのは、偶然ではなく、核出力の規模によらずその 35% が熱エネルギーとして放出されるということからの必然である。

ただし、これはかなり単純化した評価であり、特に大規模な核爆発については、実測値からの隔たりはかなり大きいのではないかと思う。

4.4.2 火球半径

$t_3 = t_{\min}$ における火球半径 R_{\min} は

$$R_{\min} = 27.4 W^{0.4} \text{ m}$$

であるとされている [ENW, pp 70]。

これは、火球（らしきもの）を観測したときの見かけの半径なのだが、瞬間的熱輐射から計算される（黒体輐射モデルでの）火球の半径との折り合いは良くない。

おそらく、問題は「火球」というものの自身の曖昧さだと思う。火球表面近くでの温度勾配は「不連続」ではなく「ぼけている」のであり、半径という概念も、表面温度という概念も、共に確定的なものではなくなって行くのであろう。したがって、火球半径については、 t_{\min} 辺りならまだましで数式で与えることができるにしても、最大半径となると

この約 2.5 倍程度

で済ますしかないようだ。

ただし、火球半径の値が重要になるのは、火球が地表に触れるか否かという評価においてであり、つまり、爆発高度の決定においてであり、精度の高い評価は必要なさそうである。

4.4.3 初期の熱線

衝撃波が火球から離れて行く t_2 までは極めて短時間ではあるが、一方、温度は 30 万度以上の高さである。黒体輐射モデルでは輐射強度が温度の 4 乗に比例するということを思い出すと、いくら空気中で吸収されと言っても、やはり t_2 までの短時間で放たれる（吸収されなかった）熱線の量がどのくらいのものなのか気になるところだ（が、これはガンマ線の窒素原子与える影響まで絡み、難解）。

ここまで、黒体輐射モデルについて輐射の強度は扱ってきたが、その輐射の波長については「極めて高い温度ではその波長はエックス線の領域であり」といった定性的な説明で済ましてきた。それでは、もう一度、黒体輐射に戻って、もう少し理論的な説明を補足することにしよう。

第5章 黒体輻射（波長について）

黒体輻射の波長の問題を中心として、物理的な側面をもう少し補う。後で必要になることは、

輻射の波長は温度により決まるが、それはピークとなる波長が決まると
いうことであり、それ以外の波長の電磁波も放たれる

ということだけである。

5.1 シュテファン・ボルツマンの法則とヴィーンの変位則

5.1.1 瞬間的強度

最初に、黒体輻射の公式を、正式な名前付きで繰り返しておこう。ただし、最初のシュテファン・ボルツマンの法則は、以前に用いた数式を正式な物理学の法則として記述しているというだけのことなので、面倒ならば、次のヴィーンの変位則まで飛ばしてしまっても良い。

黒体輻射の、温度と放出される熱エネルギーとの関係式は理論的に導かれた物理法則（シュテファン・ボルツマンの法則）であり、温度 T （単位は K、ケルビン）の黒体の表面からの輻射の強度は

$$I_T = \sigma \times 10^{-8} T^4$$

となる。係数 σ は数値としては $5.670367\ldots$ であり、単位として $J \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ T}^{-4}$ をもつと考える（シュテファン・ボルツマン定数）。この数値は、光速度、プランク定数、ボルツマン定数から求められる厳密値である。

この式は、物理学での標準に従って、エネルギーをジュールで、長さの単位（従って面積の単位）をメートルで測っているが、これをカロリーとセンチメートル単位

に換算するために、係数 5.670367 を 4.184 で割って 10^{-4} をかけると、黒体表面の単位面積（1 cm²あたり）から放出される瞬間的エネルギー P_T は

$$P_T = 1.3552486 \times 10^{-12} \times T^4 \text{ cal/sec}$$

であり、先に述べた等式

$$P_T = 1.3552486 \times \left(\frac{T}{1000} \right)^4 \text{ cal/sec} \quad (5.1)$$

を得る。

remark. この等式 (5.1) では、いつのまにか単位の記号 K が消えてしまっている。明らかに、前後の統一がとれていない。しかし、気にしないで欲しい。

このような不統一は、ここだけのものではなく、気にし始めると切りが無い。もともと、例えば T といった文字が

1. 温度という物理量そのものを表しているのか
2. それをある単位で計った数値を表しているのか

という解釈の相違があり、なかなかややっこしい。

1. 係数 σ に単位が付いていると考えるときには（その単位記号の次元をもつと考えているときには）、 T は単位付きの物理量であり
2. (5.1) 式では、 T と P_T は数値であり、

$$P_T = 1.3552486 \times \left(\frac{T}{1000} \right)^4$$

という（数値の）等式の両辺（の数値）が、cal/sec という単位をもつ物理量の意味を持つと考えている

という解釈の相違である。数学出身の立場から言うと、数式の計算が自由にできるのは数値だけであり、物理量の積と和を同時に扱うならばテンソル積でも持ち出して定義しない限り安心して使えない、という気持ちなのだが、やはり、「単位込みの計算」の便利さは捨てがたい。と言うことで、式の意味が分かりやすい限りでは、もしくは、物理学での正式な取り扱いと折り合いを付けたいときに限って、単位付きの計算とした。

単位をすべて組み込んだ等式は、いかにも難しそうであり、それだけで先に進む気を奪いがちなのだが、慣れればその見かけは「威嚇のポーズ」に過ぎないことがわかる。物理学と付き合うためには、できれば早くなれてしまった方が良い。

5.1.2 ヴィーンの変位則

黒体から輻射されるエネルギー（熱線，光，放射線，電磁波。つまり一般的に言うならば電磁波）の波長は，温度が高いほど短くなる。とは言っても，輻射される電磁波の波長は単一のものではなく拡がりをもつので，正確には

輻射される電磁波の波長のピーク λ_{\max} は，温度 T が高いほど短くなる
ということになる。

λ_{\max} の値は，ヴィーンの変位則

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

の形で与えられ，係数

$$b = 2.8977729 \times 10^{-3}$$

は，理論的に導かれる値である（正式には，右辺には単位 $\text{K} \cdot \text{m}$ をつけるべき）。

「電磁波の波長」と言っても，これは「感覚的に」把握しづらいものなので，火球の成長過程での典型的な温度での波長を計算しておこう。

$T = 10^7 \text{ K}$	(一千万度)	$\lambda_{\max} = 2.9 \times 10^{-10} \text{ m}$	エックス線
$T = 10^6 \text{ K}$	(百万度)	$\lambda_{\max} = 2.9 \times 10^{-9} \text{ m}$	紫外線に近いエックス線
$T = 2 \times 10^5 \text{ K}$	(二十万度)	$\lambda_{\max} = 1.45 \times 10^{-8} \text{ m} = 14 \text{ nm}$	紫外線（真空紫外線）
$T = 8000 \text{ K}$		$\lambda_{\max} = 3.6 \times 10^{-7} \text{ m} = 360 \text{ nm}$	紫に極めて近い紫外線
$T = 3000 \text{ K}$		$\lambda_{\max} = 9.7 \times 10^{-7} \text{ m} = 970 \text{ nm}$	赤に近い遠赤外線

ここで，nm はナノメータ 10^{-9} m であり，可視光線の波長を表すときに使われる（使われた）オングストローム 10^{-10} m に変換するためには，10 倍すれば良い。

計算例 18. 温度が 8000 K (8000 ケルビン， $8000 - 273.15 = 7726.85^\circ\text{C}$) のときの波長のピークは

$$2.8977729 \times 10^{-3} \div (8 \times 10^3) = 3.622 \times 10^{-7} \text{ m} = 362.2 \text{ nm}$$

また，温度がこの 10 倍ならば，波長は温度に逆比例するため，ピークとなる波長は

$$3.622 \times 10^{-8} \text{ nm}$$

5.1.3 火球の放つ光の波長

ピークからの拡がり

黒体から輻射される電磁波は、ピークに集中しているわけではなく、それより短い波長と長い波長に拡がって放出される。この波長を独立変数としての強度の理論式も導かれているが、核爆発に絡む現象の理解には、次の2点で十分だと思う。

- ピークの波長より短い波長の輻射は、波長が短くなるに従って急速に減少し、ピークの $1/3$ の波長ではほとんど零と見なせる。
- ピークの波長より長い波長の輻射は、波長が長くなるに従って減少するが、比較的ゆっくりと減少する。

したがって、横軸を波長、縦軸をその波長の輻射の強度としてグラフをかくと、ピークから左では急なカーブで零に近づき、右側では緩く裾野を引くカーブとなる。

初期の閃光

ピークの波長より長い波長の強度は、それ程急速に強度が減少するわけではないので、

1. ピークの波長がエックス線や紫外線の領域であり、それは空气中で短距離で吸収される場合であっても、
 2. その「ピークより右の裾野」には可視光線の波長も含まれ、
 3. 可視光線に対しては空気は「透明」であり、遠方まで届く
- ということが導かれ、

初期の輻射はすべて周囲の空気に吸収され火球の成長に寄与する
とも言い切れないということになる。

したがって、確かに、初期にも強烈な閃光により熱エネルギーの一部が放出されるのだが、一方で

火球表面より少し外側に、波長の短い輻射が空気（中の窒素）に引き起こす化学反応により不透明になった層が生じ、これも火球の見かけの温度を低下させる（遠くまで届くはずの輻射を遮蔽する）

というメカニズムがあり、このメカニズムの助けもあって、閃光の2度目のピーク t_{\max} 以前に放出される熱エネルギーは、全熱輻射の20%程度に留まる。

火球の色

放出される波長は単独の波長ではなく、ピークを中心としてある程度拡がっているので、例えば3000 Kの場合のように遠赤外線の波長をピークとしていても、それよりも波長の短い可視光線の「色」が見えることになる。つまり、火球は赤から橙色の「火球」として見えることになる。実際、もっと温度の低い「灼熱の焼きごて」でも、それは「遠赤外線」という見えない「色」ではなく、「灼熱」の色として見ることが出来る。

同様に（ただし、逆に長い波長について）、8000 Kのようなほとんど紫外線のピークをもつ場合でも、それより長い波長の「色」が混ざって、「太陽のような白色光」として見えることになる。ただし、この場合のメカニズムは、もう少し複雑であり、紫外線は空气中で吸収されやすいという効果もあり、8000 Kの火球は「フィルター越しに見た火球」ということになる。

太陽の光も、太陽を黒体輻射としてみるならば、その温度は5800 K程度であり、ピーク波長は500 nmの「緑色」のはずである。もちろん、ピークからの拡がりのために、太陽光と言えば「白色」となるのだが、大気というフィルターの影響により、「黄色」ったり「真っ赤」たりと変化することになる。

ここで問題になるのは、太陽光の紫外線である。夏にUVケアのクリームを塗ることからもわかるように、紫外線は無視できない。しかし、

1. 太陽光のピーク波長は可視光線のまん中辺りであり、そこから左側（波長の短い側）の紫外線、特に波長の短めの紫外線の強度は、かなり小さいはずであり、
2. しかも、紫外線、特に波長の短い危険な紫外線は、空气中で速やかに吸収される

ということを考慮すると、太陽光から人間が浴びる紫外線の強度はかなり小さいはずなのだ。

これは本質的な問題であり、要点は、

いわゆる放射線や紫外線の危険性は、強度（エネルギーとしての強度）で他の波長のものと比較しても無意味

ということであり、つまり、「放射線」は単純に焼き尽くす熱線などと比較すべきではない危険性を持つということである。したがって、放射線については、後でまとめて扱う。

ここでは、初期の閃光による「失明」について触れておく。

初期の閃光による「失明」も、単純にエネルギー（受け取る熱量）という観点からのみで考えることは適切ではない。閃光は、エネルギーとしては余り大きくないとしても、ある程度の距離で直視した場合には確実に視力を失う。この効果には、初期の閃光に含まれる紫外線が大きく寄与し、一方で紫外線は空气中で吸収されるという面もあるので、「ある程度の距離で」という漠然とした評価以上は難しい。

いずれにせよ、「ある程度の距離」から見た火球の「色」は、白色などというものを越えて「色見えなくする」色ということになり、これは相当に危険なことである。ただし、不幸中の幸いではあるが、「ある程度の距離」での「失明」は、「かなり近い距離」でない限り、永久失明ではなく、「ある程度の時間で」回復するらしい。

もうひとつ、これは「不幸中の不幸」なのだが閃光と同時に受ける放射線の方が致命的であり、航空機の操縦者（特に指揮官を乗せた司令機の操縦者）でない限り、閃光による失明はあまり気にすることはない。一方、例えば、そのような操縦者の場合、放射線による死は確実であっても時間的余裕はあるので、失明という即時効果を避けてなんらかの対応をする時間を稼ぐことは必須なのである……という世界なのだろうか。

5.2 波長とエネルギー

5.2.1 電子ボルト

波長と eV の換算

ここまで、黒体から輻射されるエックス線、紫外線、可視光線（一般に電磁波）の特徴を表すために、主に波長を用いてきたが、エックス線やガンマ線などのいわゆる「放射線」（電離放射線）に対しては、「エネルギー」を用いて表現することの方が多い。

前にも述べたが、波長の代わりに用いられる「エネルギー」は、電磁波を粒子（電磁波の場合は光子 photon）と考えたときの

粒子一粒の持つエネルギー

であり，これは波長に逆比例する。つまり，

- 波長が短いほど光子のエネルギーは高く，
- 波長が長いほど光子のエネルギーは低い

ということになる。ただし，光子を「粒子」と言ったところで，その質量（静止質量）は零であり，しかし，エネルギーは持つ。逆に，例えば静止している陽子の波長は？などと問い合わせると訳がわからないことになる。この辺りは特殊相対性理論と量子力学の両者が絡み，「日常的」物理学的直感は通用しない世界である。

おそらく，無難な解釈は，その場しのぎ解釈ではあるが

波長の逆数にある係数を乗じたものを「エネルギー」と言い，eV（電子ボルト）という単位で表す

と考えることであろう。

繰り返しになるが，気をつけなければならぬことは，

例えば火球の放出する電磁波のエネルギーと言ったときの「エネルギー」は，波長と逆比例の関係にある「エネルギー」に粒子の個数（光子の個数）をかけたもの

ということである。

波長とエネルギー（電子ボルトで測ったエネルギー）の逆比例の関係式は

$$E \cdot \lambda = 1239.8$$

である。ここで， E は電子ボルトを単位として測った数値でありで，波長 λ を表す数値の単位は $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ である。

remark. 式の右辺に単位を付けないために， E, λ を数値として扱うという「裏技」を使ったのだが，普通に「 E はエネルギーであり単位は電子ボルト， λ は波長であり単位はナノメートル」として式を書くと

$$E \cdot \lambda = 1239.8 \quad [\text{eV} \cdot \text{nm}]$$

となる。右辺だけを見ると奇異に感じるのだが，例えば下の例で， $E = 10 \text{ eV}$, $\lambda = 123.98 \text{ nm}$ なので，

$$(10 \text{ eV}) \times (123.98 \text{ nm}) = 1239.8 \text{ eV} \cdot \text{nm}$$

と（単位を付けたままで文字式のように）計算してみれば、右辺に単位 [eV · nm] が現れる理由が分かる。

計算例 19. 10 eV 以上のエネルギーを持つ電磁波を電離放射線という。10 eV のエネルギーを波長に換算すると、123.98 nm であり、真空紫外線の領域に属する。

計算例 20. 遠赤外線からエックス線までについて、下の表の中央に与えられている波長から電子ボルトで表したエネルギーに換算することができる（表の右側の数値）：

遠赤外線	~ 750 nm	~ 1.65 eV
可視光線	750 nm ~ 380 nm	1.65 eV ~ 3.26 eV
紫外線	380 nm ~ 10 nm	3.26 eV ~ 124 eV
エックス線	124 nm ~ 0.1 nm	10 eV ~ 10 keV

例えば、750 nm の可視光線では

$$E \times 750 = 1239.8$$

$$E = 1239.8 \div 750 = 1.65$$

なので、そのエネルギーは 1.65 eV。

remark. この表での波長の表示は、エネルギーに合わせて

長い波長 ~ 短い波長
と変則的な表示をしている。

remark. この表では、10 eV ~ 124 eV の範囲で紫外線とエックス線がオーバーラップしているが、これはそれぞれの発生機構に基づく重複である。簡単に分類するならば、紫外線は 10 eV 以下のエネルギーのものとして重複を片付けてしまうと、エックス線からが電離放射線ということになり理解しやすい。

電子ボルトとジュール

電子ボルトもエネルギーを計る単位のひとつなので、ジュールやカロリーといった通常の単位に換算することが出来る。

$$1 \text{ eV} = 1.9602 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.8310^{-20} \text{ cal}$$

この数値は、通常、電子ボルトで表される 1 原子核辺りで発生する核分裂や核融合の（例えば）1 kgあたりの発生するエネルギーを求めるときなどでは必須である。しかし、ここでは、1 eV, 1 keV = 10^3 eV, 1 MeV = 10^6 eV などは波長の代わりに使われるエネルギーの単位、と思っておくだけで良い。

エックス線の空気中での吸収

エックス線というものの第一印象は、「身体の中まで見通せる透過力の強い放射線」というものであろう。放射線という点について言えば、確かに電離放射線であり、体内で有害な化学反応を起こす危険な電磁波である。また、身体の中まで見通せるという点も、その通りなのだが、見通せる理由は透過性が高いというためではなく、可視光線のような透明・不透明という選り好みをしないためであり、空気のような「透明な媒体」での透過性について言うならば、可視光線のように遠くまで届くことはなく、短距離で減衰する。

0.5 keV 以上のエネルギー E keV を持つエックス線（この場合のエネルギーは、波長に逆比例するエネルギー）について、空気中でその強度（波長に逆比例するエネルギーではなく、全体としての放射線の強度）が、空気中で半減する距離 r は、次の式で与えられる [ENW, pp 307]。ただし、これは“mean free path”の評価式であり、ここでは、それに $\log 2$ をかけて半減距離としている。

$$r = 0.138 E^3 \text{ cm} \quad (E \text{ の単位は keV})$$

計算例 21. この式の下限 $0.5 \text{ keV} = 500 \text{ eV}$ のエックス線が空気中で半減する距離は

$$0.138 \times (1/2)^3 = 0.01725 \text{ cm}$$

であり、空気中ではほとんど透過することが出来ない。

計算例 22. 10 keV のエネルギーのエックス線が空気中で半減する距離は

$$0.138 \times 10^3 = 138 \text{ cm} = 1.38 \text{ m}$$

計算例 23. 10 keV のエックス線となると、空気中でそれなりの距離を進むことが出来るのだが、それでは、 13.8 m , 138 m , 1.38 km でどのくらい弱くなるかというと、

$$\begin{aligned} (1/2)^{10} &= 1/1024 = 10^{-3} \\ (1/2)^{100} &= (10^{-3})^{10} = 10^{-30} \\ (1/2)^{1000} &= (10^{-30})^{10} = 10^{-300} \end{aligned}$$

であり、そのエックス線が純粹に单一の波長のみを含むならば、それがどれ程強力なものであっても、1 km の距離では完全に零になるとみなすことができ、被曝の心配をすることはない。宇宙からとてつもないエックス線が降り注ぎ、という設定ならば、上空の大気全体が加熱され地球が火球となってしまう、というストーリーも考えられるかも知れないが、核兵器はそれほど強力ではない。

結論として、核爆発での人体に対するエックス線被曝は、無視してしまうことが出来る。逆に宇宙空間での核爆発の場合ともなると、核兵器は放射線兵器となるのであろう（デブリからの輻射はエックス線の波長）。

remark. ここでは「半減する距離」についての式を考えたが、「自然対数分の 1 になる距離」を考えることの方が多い。

remark. 0.5 keV 以下のエックス線では透過性はもっと低く、真空紫外線となるとほとんど空气中を進むことが出来なくなる。それでは、「初期の閃光に含まれる紫外線による失明」などというものは考える必要がないのか、ということになるのだが、実際はそう単純ではない。透過性の高いガンマ線が近くまで届いてから散乱して紫外線となる、などという面倒なメカニズムはたくさん考えられそうであり、また、紫外線も波長が長くなり可視光線に近づくと空气中を進むことが出来るようになる、という面もあり、無視するというわけには行かない。

remark. エックス線被曝という放射線被曝を核爆発の被害から除外してしまうことが出来る理由は、他の放射線被曝が余りにも強烈であるためであり、そもそも、日常の安全性とは比較基準が違うのだ。

remark. あっさりと、可視光線は透明な空气中で高い透過性をもつと説明してしまったのだが、本当は、

- ガンマ線やエックス線が空气中を透過する
- 可視光線が空气中を透過する

というときの「透過する」という意味は、メカニズムとしては全く異なる。ひどい説明だとは思うが、

- ガンマ線やエックス線が透過するという意味は、空气中の原子核や電子に「気づかれずに通り抜ける」ということであり

- 可視光線が透過するという意味は、「媒体の電子を振動させて同じ波長のものを発生させるので透過しているように見える」

ということで納得して欲しい。ガンマ線やエックス線については、コンプトン散乱を初めとするいくつかのケースを勉強すれば、それなりの理解を得ることはできるのだが、それと同時に可視光線の場合（こちらは量子力学と言うよりはファイマン物理の2巻）と合わせて理解しようとすると、むしろ大変ではないだろうか。

つまり、透過ということのメカニズムは考えずに、計算だけするのが無難な選択であり、可視光線については「だいたい透過する」として済ませてしまうことにしよう（ただし、地学の試験を受けると落ちる）。

remark. エックス線よりエネルギーの高いガンマ線については、次の章で、やはり極端に単純化して扱う。

第6章 ガンマ線の遮蔽

核爆発により放たれるガンマ線と中性子線は、熱線や爆風と同様、地上の生き物に致命的な被害をもたらす。ここでは、主にガンマ線が空気やコンクリートなどの遮蔽物により、どのように減衰するかという計算をする。

核爆発の瞬間から火球の温度がある程度低下するまでの間、火球から放たれる熱線は、地上の生き物に被害を与え続ける。その被害の程度は、爆心点からの距離が増加するにしたがって小さくなっていく。熱線と同じく、ガンマ線などの放射線も、核爆発の瞬間から火球に含まれるデブリの放射能がある程度低下するまでの間、地上の生き物に被害を与え続ける。この被害（初期放射線の被害）の程度も、爆心点からの距離に依存するので、これを評価したい。

しかし、熱線の場合と比べて、放射線の評価はなにかと複雑で難しい。極めて乱暴な話だが、最初に、大枠としての結論と計算を提示してしまうことにする。どのように乱暴なのかという点については、その後で検討する。

6.1 計算

6.1.1 単位

シーベルト

ある地点における、火球が放つ放射線の被害の程度は、シーベルト（記号は Sv）という単位で表すことができる。一応の目安として、次のデータを用いる (Mc. pp.81)。

6 シーベルト以上	確実に死亡
3.5 から 6 シーベルト	多数が死亡
2.5 から 3.5 シーベルト	死亡する場合もある
1.5 から 2.5 シーベルト	症状は出るが、回復する
1.5 シーベルト以下	短期間での効果は現れない

1. ここでの「短期間」は、「1ヶ月以内での」という程度の期間を表す。
2. 6 シーベルトの被曝をして「助からない」ケースでも、そして吐き気や嘔吐は即座にもよおすにしても、100% 死亡は「一週間以内に」とされている。
3. 50 シーベルトというとんでもない被曝をした場合でも、「一日ないし二日以内に」死亡とされており、「即死」というイメージからは遠い。
4. 一方、短期間での効果は現れないということの意味は、「安全である」ということからは程遠く、将来的・確率的な死亡リスクは確実に存在する。たとえ非常時の基準としても、「安全」と主張できるためには、0.1 シーベルト程度までは下げる必要がありそうだし、ましてや平時の基準となると、更に一桁から二桁下げる事になるのであろう。

いずれにせよ、核爆発に伴う被曝について言うならば、それ以外の様々な作用も同時に受けるので、あまり細かい区分をしても意味がない。これから計算での目安として、

- 6 シーベルトで確実に死亡
- 3 シーベルトでは死亡のリスクがあり
- 1.5 シーベルトでは死亡する可能性は低く
- 0.75 シーベルトならば「安全」

としておこう。0.75 シーベルトから、ちょうど、2 倍、 $2^2 = 4$ 倍、 $2^3 = 8$ 倍となっていて、考えやすいのだ。

グレイ

被曝量はシーベルトという単位で測ると言ったが、グレイ（記号は Gy）という単位を用いることもある。シーベルトは生体へのダメージを測るときの単位である一方、グレイは物理的な量を測っているときの単位なのだが、ガンマ線については、どちらもほぼ等しい数値となるので、ひとまず、両者の区別は忘れることにしよう。

6.1.2 空気中の減衰

前提

空気によるガンマ線の遮蔽効果を評価する。ここでは、物事を単純化して、また、計算しやすいように、

空気の遮蔽効果により、ガンマ線は 250 m の距離で半減する

として計算してみることにしよう。

熱線と同様、ガンマ線も爆心点からの距離の 2 乗に反比例して減衰するという側面もあるのだが、ここでは、空気による遮蔽のみを考慮して減衰を評価する。

安全と死の間の距離

計算例 24. 核爆発の爆心点から斜距離で 5 km 離れた地点でのガンマ線量が 6 Gy であるとする。このとき、強度が 3 Gy, 1.5 Gy, 0.75 Gy となる斜距離を求めと、このガンマ線は 250 m で半減するので、斜距離が

- 5.25 km で 3 Gy
- 5.50 km で 1.5 Gy
- 5.75 km で 0.75 Gy

であり、斜距離が 750 m 伸びただけで「安全」になる。同様に、斜距離で 20 km 離れた地点でのガンマ線の強度が 6 Gy となる巨大核爆発についても

- 20.25 km で 3 Gy

- 20.50 km で 1.5 Gy
- 20.75 km で 0.75 Gy

であり、やはり斜距離が 750 m 伸びただけで「安全」になる。一方、斜距離 1 km で 6 Gy の被曝となる原子爆弾でも、やはり同じ計算が成り立ち

- 1.25 km で 3 Gy
- 1.50 km で 1.5 Gy
- 1.75 km で 0.75 Gy

となる。この場合も、同じく斜距離が 750 m 伸びれば良いのだが、こんどは、1 km という距離と比較して「750 m 伸びただけ」と言って良いかは、疑問。

これらの計算例は、かなり単純化したものではあるが、爆発の規模によらず、0.75 から始めて 0.75, 1.5, 3, 6 と三段階で増加する危険度を知らせる標識が、爆心点に向かって 250 m 間隔で立っているイメージなのだ。どれ程大きな規模の核爆発であっても、この間隔は変わらず、「短期的には安全」から「死」までの距離は 750 m と、意外に短い距離に固定されている。

もちろん、これは放射線被曝（後で説明する用語を用いれば、初期放射線の被曝）に限定し、また、極端に単純化した計算であり、信頼性は低いが、熱線の被害と異なり、安全と致命的との間の距離が「ある程度固定されている」という点は、重要である。

6.2 問題点

それでは、ここまでの大まかな話をしておき、もう少しまともなものにしよう（と試みる）。

最初に

remark. 放射線の減衰の問題は、核爆発特有のものではない。早い話、放射線取扱主任者の資格を持っていれば、簡単な話なのだと思う。それならば、その方面的専門家が書けば良さそうなものなのだが、専門家が書くと、細部が見え過ぎる故に（そして、専門家としてのプライドが誤りを含む説明を許さない故に），読むに堪えないほど難しい説明になる（のがお約束）。

remark. 核爆発のもたらす放射線の被害のうち、火球に含まれる「地上から遠く離れた放射性物質」の与える被害、「初期放射線」の被害、について計算した。火球に含まれる放射性物質が地上に降り注いだ後の被害ではない。それについては、「残留放射線」の章で検討する。

remark. 初期放射線には、ガンマ線の他にも中性子線がある。中性子線もガンマ線と同じような振る舞いをするが、ガンマ線よりも「物質の選り好み」（原子核の反応断面積というもので決まる）が強く、また、中性子線が遮蔽物に当たってガンマ線を出すなどと、色々と面倒（なので、主にガンマ線について計算する）。

remark. 热線の被害の程度が単位面積に照射される热エネルギーとして定量化することができたことと対照的に、放射線の被害の定量化は、热照射とは比較にならないほど複雑であり、難しい問題を含む。

シーベルトは生体への影響を計っている単位なので、物理学に留まらない難しさを含むのは当然なのだが、そもそも、物理的な影響を計る単位のグレイの段階で、定義そのものが難しい。

これについては、放射線の専門家によるテキストがふんだんにあるので、まともに勉強するならば、それを読むべき。

まともに勉強したくない人のために、後で雑な説明をする。雑な説明と言うより「なぜ定義そのものが難しいのか」という理由の説明のようなものだが。

他にも断つておくべきことはあるのだが切りが無いので、減衰の速さの比較の問題に移る。

ガンマ線の減衰・短距離的ということ

熱線の被害、爆風（ショック・ウェーブ）の被害、放射線の被害と検討するとき、まず言えることは、

空气中では、放射線の効果は「短距離的」である

ということである。しかし、これは、あまりにも現実離れした言い方であり、現実問題としては、放射線の被害は熱線や爆風の被害ほど遠距離まで届かないにしても、それでも、かなりの距離まで及ぶ。

「短距離的」という用語は、説明が必要である。

減衰の速さの比較

それでは、色々な現象の効果が距離と共に減衰していくときの「減衰の速さ」を比較してみよう。

減衰しない : これは理想的なレーザービームのように、直線上を進み全く拡がらない場合

距離に反比例して減衰 : 典型的な例は、海面の1点で発生し海面を拡がって行く円周のように、半径に比例して長さが増加する円周上に等分配されながら拡がって行く場合など

距離の2乗に反比例して減衰 : 空間の1点で発生し3次元空間を拡がる球面のように、半径の2乗に比例して面積の増加する球面上に等分配されながら拡がって行く場合など

距離の3乗に反比例して減衰 : 空間の1点で発生した高圧のガスが膨張していく場合のように、距離の3乗に比例して増加する球の体積を埋め尽くしながら拡がっていく場合など

指数関数的減少 : 一定の距離を進むと一定の率で減少する場合

減衰しないケースは現実的ではないので考えないことにする。それ以外の減衰するケースそれぞれについて、減衰の仕方を表す式は、距離を r として、

$$\text{距離に反比例して減衰} : \frac{C_1}{r}$$

$$\text{距離に2乗に反比例して減衰} : \frac{C_2}{r^2}$$

$$\text{距離に3乗に反比例して減衰} : \frac{C_3}{r^3}$$

$$\text{指数関数的減衰} : C 2^{-\mu r} (= C \times 2^{-\mu r})$$

と表される。ここで、 C_1, C_2, C_3, C, μ は正の値の定数であり、それぞれの現象に依存して定まる。

ある地点でのそれぞれの効果の強さは、係数 C_1, C_2, C_3, C などに依存するので、なんとも言えないが、距離 r が1倍、2倍、4倍、8倍……と増えていく場合には、反比例、2乗に反比例、3乗に反比例であり

反比例して減衰 : $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots$

2乗に反比例して減衰 : $1, \frac{1}{4}, \frac{1}{16}, \frac{1}{64}, \dots$

3乗に反比例して減衰 : $1, \frac{1}{8}, \frac{1}{64}, \frac{1}{512}, \dots$

と減少していく。このなかでは、3乗の場合が最も減り方が速い。

指数関数的減少は、本来は自然対数の底 $e = 2.71828\dots$ を使って $Ce^{-\mu x}$ の形で表すべきものだが、ここでは「半減」ということの考え方やすさを尊重して、 $C2^{-\mu x}$ の形を用いている。指数関数的減少の場合には、反比例等の場合と異なり、 $\mu^{-1} = \frac{1}{\mu}$ を単位とする距離で考える必要があり、

距離 x が、 μ^{-1} の 1 倍、2 倍、4 倍、8 倍 …… と増えていく場合、効果は

$$C \cdot \frac{1}{2}, \quad C \cdot \frac{1}{2^2} = C \cdot \frac{1}{4}, \quad C \cdot \frac{1}{2^4} = C \cdot \frac{1}{16}, \quad C \cdot \frac{1}{2^8} = C \cdot \frac{1}{256}, \dots$$

と減少して行く。

ここまでなら、指数関数的減少は3乗に反比例する減少に負けている感じもするのだが、1倍、2倍、3倍、8倍からもっと距離を離して、10倍、20倍としてみると、

3乗に反比例する場合 : $\frac{1}{1000}$ 倍, $\frac{1}{8000}$ 倍

指数関数的減少 : $\frac{1}{1024}$ 倍, $\frac{1}{1048576}$ 倍

であり、指数関数的減少の圧勝に変わる。さらに 30 倍となると、3乗に反比例のケースでは、いまだに 27000 分の 1 である一方、指数関数的減少では最初の値の約 10 億分の 1 となり、ほとんど無視できるようになる。つまり、指数関数的減少では、最初のうちはともかく、ある程度離れると急速に減少し始めるということであり、その意味で

指数関数的減少をする効果は、短距離的である

ということになる。

可視光線とガンマ線

可視光線もガンマ線も、1点（もしくは1点と見なせる程度の範囲）から輻射され空气中で球面として拡がって行く場合、

- 球面が拡がっていくことに依る2乗に反比例しての減衰
- 空気中の吸収による減衰

という2つの影響を受ける。可視光線については（熱線についても）、ひとまず空気による減衰は無視して、拡がっていく球面に等分配されることに依る減衰のみを考え、計算をしてきた。一方、核爆発に伴うガンマ線については、空気による減衰の効果は

250 m で半減

とかなり大きいと仮定したので、最初に、球面が拡がる効果はとりあえず無視して、空気による減衰のみを考えた。

例えば、爆心点から距離 2 km の距離でのガンマ線被曝と 4 km での距離でのガンマ線被曝を比較すると、

- 4 km と 2 km の差 2 km は 250 m の 8 倍なので、空気による遮蔽効果により $2^8 = 256$ 分の 1 に減衰
- 4 km は 2 km の 2 倍なので、球面が拡がる効果により $2^2 = 4$ 分の 1 に減衰

であり、空気による遮蔽効果の方が大きい。

remark. 距離は、爆発点からの斜距離を用いるべきであり、したがって、250 m で半減すると言うことを、地上に 250 m 間隔で標識が立っていると説明するのは、正確ではない。しかし、核爆発の高度は、その規模に応じて効果を最大化するよう設定するのが普通であり、その場合、爆心点直下（グラウンドゼロ）近く以外では（つまり、放射線被曝の程度を問題にしてもしょうがない付近以外では）、爆心点の見かけの高さは低く、斜距離と地上で測った距離にそれ程の違いはない。

remark. 空気による吸収の効果と球面が拡がる効果を比較すれば、確かに遮蔽効果の方が大きいのだが、それでも、 $1/4$ という倍率を無視して計算するのは、あまりにも雑に見える。しかし、実は、250 m で半減という評価自体が雑な評価なので

あり、例えば、核爆発による気圧の減少などの影響により、この値は大きく変化する。要するに、雑に見えるのではなく、実際に雑な評価をしているのだ。

それでは、250 m という評価の根拠に戻ろう。

ガンマ線の半減距離

必要になるデータは、空气中でガンマ線が、どのくらいの距離で半減するのかという「半減距離」のデータである。これはガンマ線のエネルギー（波長に逆比例するエネルギー）に依存する。次のデータは、[ENW, pp 356] の表に基づいて核爆発で問題となるエネルギーについての半減距離を求めたものである。

0.5 MeV	63.0 m
1 MeV	85.6 m
2 MeV	121.6 m
3 MeV	150.7 m
4 MeV	169.1 m
5 MeV	198.0 m
6 MeV	266.0 m

これらの数値は、爆発に伴って気圧が低下することを考慮して 1 気圧（つまり、1013.25 ヘクトパスカル）ではなく 1000 ヘクトパスカルの空気としているようだが、そのような微妙な設定を議論する以前に大きな問題があり、実際には、

これ程短い距離で減衰するわけではない。

実は、ここでの計算の根拠とした [ENW, pp 356] の表では、

ガンマ線のビームの減衰

を考えているのだ。つまり、媒体と全く無反応に「通り過ぎた」ガンマ線（の光子）以外は「失われた」と考えての減衰を測っている数値であり、言い換えると散乱したガンマ線の影響は無視して評価しているのであり、核爆発については、空気による遮蔽を過大評価していることになる。

これを修正したとしても、核爆発のガンマ線は、これらのエネルギーのガンマ線が混ざった状態で放出されるので、それらの分布（スペクトル分布）のデータが必要になり、複雑な計算をすることになる。

したがって、とりあえずは、

250 mm で半減する

という乱暴な単純化で押し通すことにする。

爆発の規模との関係

単純に考えれば、爆心点から一定距離の地点での被曝量は、何キロトン、もしくは何メガトンかという爆発の規模（核出力）に比例する。ただし、これは核爆発の種類にかなり依存し、ガンマ線と中性子線の比率も変わる。

この違いを無視したとしても、次の例のように極端にスケールの違う比較となると、空気の遮蔽効果のみで比較するのは無理であり、球面の拡がりなどの効果も含めて考えることが必要になる。

計算例 25. 20 kt(TNT) の核爆発では、爆心点から 1 km の地点で 3 シーベルトのガンマ線被曝を受けるとする。この数値から、5 Mt(TNT) の核爆発で距離 2.5 km の地点で受ける被曝量を求めてみる。

空気による減衰のみで計算してみよう。

1. まず、 $5 \text{ Mt(TNT)} = 5000 \text{ kt(TNT)}$ は 20 kt(TNT) の 250 倍なので、放出されるガンマ線の量も 250 倍になると考える。
2. 次に、 2500 m と 1000 m の差 1500 m は 250 m の 6 倍なので、この間の空気により $2^6 = 64$ 分の 1 に減衰すると考えてみる。
3. したがって、 $250 \div 64 = 3.9$ 倍されることになり、求める被曝量は

$$3 \times 3.9 = 11.71 \text{ シーベルト}$$

になるはず。

しかし、マクノート「核兵器」[McNaught pp 73] では、

- 20 kt(TNT) で 1 km の地点では 3 シーベルト
- 5 Mt(TNT) で 2.5 km の地点では 6 シーベルト

という計算が紹介されている。

つまり、計算結果は過大評価となっている。理由は明らかであり、

半径が大きくなるにしたがって球面の面積は半径の 2 乗で大きくなる

ということによる、「距離の 2 乗での減衰」という効果を考慮していないためである。この効果を考慮すると、距離の比 2.5 の 2 乗 6.25 で 11.71 を割ってやらなければならぬのだが、そうすると、今度は、 $11.71 \div 2.5^2 = 1.8736$ であり、過小評価になってしまう。

この理由も明らかであり、半径の 2 乗で減衰という計算は、爆心点からガンマ線が輻射されるのでない限り、成立しないのだ。

確かに、核爆発の瞬間に輻射される即発放射線については、爆心点から輻射されると考えて良いのだが、マクノートの例のガンマ線量は、火球（に含まれる放射性物質）から輻射されるガンマ線も含んでいる。

火球が球体と仮定しておけば、2 乗で減衰という点に関しては（重力の場合と同様に）火球に分散している放射性物質がすべて中心あるとして計算することができそうなのだが、空気の遮蔽効果まで考えると、放射性物質の分布は観測点に近い側に偏っているとして計算しなければならない。

そして、おそらくもっと大きな要因として、衝撃波と爆風により空気が希薄になり遮蔽効果が弱まることも、考慮する必要がある。

つまり、ものごとは単純ではない。

架空のガンマ線爆弾

熱線の放出や衝撃波・爆風は全く生じず（もしくは無視できるレベルであり）、爆発の瞬間にガンマ線のみを放射する「ガンマ線爆弾」を想定してみよう。

実際にはこのようなものは存在せず、せめてガンマ線の代わりに中性子線として、中性子爆弾（よく誤解されている、静かに死の光を放つ「爆弾」というあり得ない存在）に置き換える必要があるのだが、ここでは、相変わらず、250 m で半減するガンマ線で押し通す。

このガンマ線爆弾について、

1. 致命的な被曝である 6 シーベルトの 1000 倍、6000 シーベルトの被曝を与える範囲が 500 m であるとして、
2. 「短期的に安全」の目安である 0.75 シーベルトのさらに 1000 分の 1 まで低下する距離

を求めてみよう。

remark. ガンマ線の半減距離という物理的な現象から始めると、単位はグレイを使いたくなる。一方、被曝という「生き物の側からの放射線量」となると、シーベルトを使いたくなる、というだけの理由で、ここではシーベルトを使っている。

計算例 26. $2^{10} = 1024$ は 1000 に近い値なので、

- 6000 シーベルトとその 1000 分の 1 にあたる 6 シーベルトとの間の 10 段階
- 6 シーベルトとその 4 分の 1, 0.75 シーベルトとの間の 2 段階
- 0.75 シーベルトとその 1000 分の 1, 0.75 ミリシーベルトとの間の 10 段階

の半減回数の合計として、22 回の半減が必要になる。したがって、

$$250 \times 22 = 5500 \text{ m}$$

だけ距離を伸ばす必要があり、爆心点から $500 \text{ m} + 5500 \text{ m} = 6.0 \text{ km}$ の距離があれば、被害はないものと考えられる。

最初の極端に強い被曝の範囲 0.5 km と（平時の基準でも）安全な距離 6.5 km の比は 13 倍である。なお、0.75 ミリシーベルトまで下げなくとも「戦時基準」で 0.75 シーベルトで良いと妥協するならば、10 段階 (2.5 km) 減って、4 km ということになり、9 倍で収まる。

これは、核爆発のその他の被害が「遠くまで裾野を長く引く」傾向があるのに比較すると、被害範囲が限定されているということを意味する。

それでは、こんどはガンマ線ではなく熱線について

$$0.5 \text{ km} \text{ の距離では, } 4000 \text{ cal/cm}^2$$

の照射をうけるとして、ただしこの場合には 4 cal/cm^2 の 1000 分の 1 まで小さくする必要はないので $1/64 = 1/2^6 \text{ cal/cm}^2$ 以下になれば無害であると想定して、 $2^{10+6} = 2^{16}$ 分の 1 になる距離を求めてみる。この場合は、半径の 2 乗に反比例して小さくなるということから、半径 0.5 km の $2^8 = 64$ 倍、32 km が必要ということになる。つまり、遠くまで被害の裾野が広がっている。

remark. それでは 6 Gy 地点より内側でどうなるかというと、今度は 250 m 近づくたびに被曝量は 2 倍になっていく。したがって、すぐに「オーバーキル」の領

域に入っていくことになるが、核爆発で発生する放射線の量にも限界がある。上の計算例では、20 km 離れた地点で 6 Gy という例を出したのだが、現実には、このような超巨大核爆発は存在しないはずだ。

以上、余りにも雑な評価ではあるが、ガンマ線爆弾の代用品「中性子爆弾」の特徴は、どうやら「被害範囲を限定する」という点にあるらしい。敵地よりは自国内に侵攻してきた部隊に使うことを目的としているのだろうか。

6.3 比重の高い物質による遮蔽

熱線を遮蔽することは、簡単にできる。燃焼しにくい布で覆われたトラックの荷台にいるだけで、その布は発火して燃え上がることになるにしても、強力な照射が続く数秒間を凌ぐ働きはしてくれる。普通の民家でも窓から離れた場所にいれば、なおさら安全である。ただし、周囲の家屋が一斉に発火する大規模火災から逃れることが出来るかは別問題であるが。

一方、ガンマ線の遮蔽は、かなり難しい。

6.3.1 質量による遮蔽

ガンマ線は、可視光線のような選り好みはせずに、どの物質のなかでも同じ程度に通り抜ける。ただし、その物質の質量には依存し、単位面積を通ってからある厚みで吸収・散乱されるガンマ線の量は、その部分の質量に比例する。したがって、一定の厚みでの遮蔽効果は、密度に比例することになる。

remark. これは、核爆発に伴うガンマ線についての粗い近似として言えることであり、もっと波長の長い（光子のエネルギーの低い）ガンマ線やエックス線では、（例えば）鉛の遮蔽効果は、質量に比例する以上に大きい。

250 m で半減するという空気による遮蔽効果を考えてきたが、これについても同じことで、例えば 1 辺が 10 cm の正方形で厚さが 250 m の細長い直方体に含まれる空気の質量が、この正方形を通過したガンマ線の光子を吸収・散乱することになる。

ここで問題になるのは、この空気の重さである。通常の地表の空気については、1 リットル 1.2 g という値が用いられる。一方、核爆発の場合、その規模にもよるが

ある程度上空に爆心点があることが多く、その場合、気圧は多少低くなり、空気の密度も少し小さくなる。ここでは、 $1.1 \text{ g} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ kg}$ という値を用いることにして、

250 m の厚さの空気は、 $250 \times 1.1 \times 10^{-3} = 27.5 \text{ cm}$ の水の厚さに相当

とみなすことにする。その他の物質については、水との比較により計算することにしよう。

その他の物質

土、コンクリート、鉄、鉛の比重は、多少の違いはあるものの、

土	2.0
コンクリート	2.3
鉄	7.2
鉛	11.4

という値であるとして、空気 250 m (水 27.5 cm) に値する厚さを求めるとき、次のようになる。

土	$27.5 \div 2 = 13.8 \text{ cm}$
コンクリート	$27.5 \div 2.3 = 12 \text{ cm}$
鉄	$27.5 \div 7.2 = 3.8 \text{ cm}$
鉛	$27.6 \div 11.4 = 2.4 \text{ cm}$

remark. 鉄のついでに鉛を持ち出したのだが、これには多少まずい面もあり、電子対生成などというものも絡んでくる。もちろん、これは無視する。

コンクリートによる遮蔽

空気ではガンマ線を半減させるのに 250 m 必要だったのに、コンクリートで遮蔽すれば、わずか 12 cm で済む。コンクリートは頼もしい。

本当にそうなのだろうか。見方を変えると、その 10 倍の厚さ 1.2 m のコンクリートが守っていたとしても、距離に直すと 2.5 km を稼いでくれるだけだ。近くにコンクリート壁があれば、是非逃げ込むべきだ。これは確実に言えることなのだが、一

方で、そうしたところで 2.5 km 離れた地点で遮蔽なしに放射線を浴びる人と同じ立場になると考へると、多少の虚しさがある。いわゆる「原子爆弾」という程度の規模ならば、もともと 2.5 km という距離は生死を決める距離なのだが、「水爆」という規模になると、それもメガトンで測られるような規模の水爆となると、2.5 km という距離は、被害地域の大きさに比べて、むしろ小さな距離に過ぎない。つまり、コンクリートで防御されたシェルターを持っていたとしても、ガンマ線被曝という面に関しては、それは「致死的となる爆心点からの距離を、ある程度小さくする」という効果しか持たないのである。

実は、遮蔽として最も頼りになるのは、「土」である。これは「土」が高い遮蔽能力を持つということではなく、土は簡単に利用できるためである。つまり、コンクリートや鉄で遮蔽しようとすると大量のコンクリートや鉄を予め用意しなければならないのだが、土については、極端な話、たこつぼを掘ってしゃがんでいるだけで、大量の土が遮蔽してくれることになる。

それは「核爆発から生き延びる」ということの独特な面によるのであり、

- 爆心点に近すぎる場合は、対処不能なので考える必要がない
- 爆心点からある程度離れている場合は、火球の見かけの高さは低い
- したがって、たこつぼにしゃがんでいる自分の身体と火球を結ぶ線分は、地面に平行に近い角度であり、かなりの量の土を通り抜けることになる
- よって、ガンマ線は、多量の土により減衰される

という、かなり入り組んだ理屈を根拠としている。

しかし、残念なことに、ガンマ線の散乱というものもあり、頭上からの照射も受けすることになる。したがって、できれば、土嚢でたこつぼを覆っておくと良い。もちろん、地下鉄や地下街は、かなりの遮蔽効果が期待できるので、二次的な災害は無視することにすれば、望ましい避難場所である。

6.3.2 ガンマ線の減衰

そろそろ、散乱という問題を無視することが難しくなってきたので、この厄介な問題に触れることにする。

ガンマ線の散乱

透過するということの意味が問題になる。最も簡単な「透過」は、

媒体（この場合は空気）と何の相互作用もせずに通り抜ける

という意味での透過であり、これに基づいて減衰を計算する場合、

媒体と相互作用した光子（ガンマ線という電磁波を、粒子とみなしたときの粒子の名前）は「無くなったもの」と考える

ということになる。しかし、核爆発のガンマ線として想定したエネルギーの場合、通り抜けようとしている媒体との相互作用は、主に「コンプトン作用」と呼ばれる「電子との衝突」なのだ。コンプトン作用により媒体（の中の電子）と相互作用した光子は、吸収されるのではなく、

エネルギーのいくつかの部分を失って、別の方向に飛んで行く

という「散乱」をすることになる。したがって、通り抜けに失敗した光子も、エネルギーが多少低くなり方向も変わるとはいえ、まだ飛び続けているのであり、実際には、この散乱によるガンマ線被曝も無視できる率ではない。

remark. ガンマ線が細いビームとして媒体を通り抜け、そのビームの的として小さな測定器が置かれているという設定ならば、方向を変えられた光子は測定器に飛び込んで来ることはないので、「無くなったもの」と考えることができる。つまり、レーザーポインタのようなガンマ線に狙われていることを想定しての遮蔽を考えているならば、散乱された光子は逸れていくので「無いもの」として考えることができ、媒体と何の相互作用もせずに通り抜けた光子のみが脅威となる。一方、核爆発のガンマ線のように面としての向かってくる場合には、散乱により目標を逸れる光子がある一方で、目標に当たらないはずだった光子が散乱されて命中することもあり得る。遮蔽の効果を考える場合、散乱により方向を変えられる効果は頼りにならず、散乱によりエネルギーを失う効果のみが頼りになるということになる。

こういった問題には立ち入らずに、単純に「250 m で半減」で済ますことにしてきた。核爆発の被害に関しては、精密な評価はあまり必要ではないのだ。

一方、「精密な評価は余り必要でない」の対極にあるのは、平時における「放射線源の安全な遮蔽」という課題であり、要するに「放射線取扱主任者」に必要な難しい課題である。

この場合、単に散乱の評価だけではなく、「遮蔽壁の中にある曲がりくねった配管の中を、散乱による「反射」を繰り返してわずかに漏れ出てくる微量な放射線」などというものまで計算して基準値に収めねばならない。仮にこの計算に失敗してアルミ箔一枚で基準値に収まるくらい微量な（放射線の）漏れが一ヵ所あつただけで、「放射能が漏れた」と騒がれる事態になる……というくらいの精密でかつ絶対に間違えてはいけない評価が必要になる。

繰り返しになるが、核爆発に伴うガンマ線被曝の評価では、精密な評価は必要なく、

- 絶対に助からない
- 対処の余地がある
- 直ちに死の危険はない（将来的な、確率的なリスクはあるにしても）
- 将来的なリスクも含めて、余り心配はない

という程度の評価が出来ればよいのだ。

remark. もうひとつ、重要な兵器の運用に関わる兵員については、「絶対に助からない被曝をしているのだが、戦力として期待できる時間は残されている」という可能性の評価もあるようなのだが（マクノート「核兵器」に言及されている），仮にこのような評価が必要になるとしても、そこで要求されるのは計算の精度ではなく、放射線による死というものの特徴を理解することあろう。

6.4 その他の放射線

ガンマ線以外の放射線について、簡単に触れる。

要点は、

放射線の危険性は、貫通力・透過性と一致するわけではない

ということである。貫通力という言葉を使ったが、これは勇敢な歩兵の隊列をなぎ倒していく砲弾のようなイメージを伴うので、好ましくない。透過性という「なにもしないで通り過ぎていく」というイメージの方がましなので、透過性という言葉を用いることにする（ただし、散乱という問題が絡み、必ずしも「なにもせずに」として定義している訳ではないのだが）。

6.4.1 無害な放射線

ニュートリノ

「放射線」の一種として、しかし、全く無害な「放射線」として、ニュートリノというものがある（反ニュートリノというものもあるが、これもニュートリノと言ってしまうことにする）。ニュートリノは極めて高い透過性を持ち、したがって、どのような物体に当たっても、なにもせずに通り抜けて行く。したがって、めったなことでは、被害を与えるどころか観測することもできない。「透過性」と危険性は、同じではないのだ。

それにも関わらず、ニュートリノはエネルギーを分担することができ、核分裂では、放出されるエネルギーのうち約5%は、ニュートリノが分担し、なにもせずに持ち去ってしまうことになる。これは、核爆発が放出するエネルギーが、熱線・ショック・ウェーブ、放射線のエネルギーに分配される比率について記述するとき、すっきりしない混乱をもたらす。被害という側面（もしくは兵器としての効果という側面）で議論しているときに、ニュートリノのような「なにもしない」ものを「放射線」に含めても意味がない。

この点に関して、一番簡単な解決法は、

5%という比率は少ないのでニュートリノは無視

ということであり、核爆発についての計算のような、数値の精度が低い場合では、これが推奨される解決手段であろう。

非電離放射線

ニュートリノのような「なにもせずに通り過ぎていく」放射線は、完全に無害であり、身体を通り抜けようとした放射線が害を与えるのは、通り抜けに失敗した場合である。

それでは、通り抜けに失敗した場合には必ず「放射線としての被害」を与えるのかというと、そうではない。「放射線からの被害」は、最終的には、通り抜けに失敗した粒子（放射線として飛んでくる粒子、光子も粒子とみている）が持っていたエネルギーが（もしくは、その一部が）、原子から電子を引き離しイオンを作ることに依る。この体内で生じてイオンの化学的作用により、組織が損なわれるのであり、この段階では、一種の化学兵器として働いていることになる。

反対に、通り抜けに失敗した「放射線」のエネルギーがすべて熱エネルギーに変わらなければ、これを「放射線の被害」と言うことはない。物理学では、電磁波をす

べて放射線と言うので、熱線の被害、つまり光子のエネルギーがすべて皮膚表面での熱に変わり火傷を負わせる場合も、「放射線の被害」ということになるのだが、これでは不便なので、このように電離を引き起こせない「放射線」は非電離放射線と呼び、電離を引き起こしうる放射線を「電離放射線」と呼ぶ。もちろん、物理学でも、文脈から明らかな場合、単に放射線と言えば「電離放射線」を意味する場合が多い。

ここでは、電離放射線という学術用語を避けたかったので、電離放射線のみを放射線と言い、非電離放射線（可視光線や熱線など）の「放射」は「輻射」と言うことにしてきた。核爆発について述べている限りでは、これで問題はないと思う。

remark. ただし、「吸収される放射線の量」を正確に定義しようとすると、ガンマ線や中性子線という「電離放射線」による電離（された高速の電子）が、そのエネルギーの一部を「非電離放射線」を発生させることで消費するという現象もあり、定義が面倒になる一因となる。

アルファ線とベータ線

やたらに高い透過性をもつニュートリノの対極にある放射線がアルファ線であり、薄い紙を透過することも出来ない。

アルファ線よりは少し高い透過性をもつものとしてベータ線があるが、これもアルミ箔程度の遮蔽物で防ぐことが出来る。

アルファ線とベータ線については、後の章で「残留放射線」として説明するが、これらは、外部からの被曝としては防御しやすいにしても、体内に取り込んでしまうと、それが高い透過性を持たないからこそ、狭い範囲に「毒」を集中させ、深刻な影響を与えることになる。

remark. アルファ線やベータ線の体内被曝についてだが、ガンマ線の絡みで「体内に取り込む」ということの意味を（比喩としてなのだが）広く考えてみよう。

ガンマ線与える被害のメカニズムは、光子が直接に身体の組織を破壊するのではなく、体内で高エネルギーの電子線を発生させることによる。これを、「体内被曝」とみなしてみよう。中性子線も、周囲の電子と共に電気的中性を保っていた原子核を弾き飛ばして電子から引き離し（電子に比べて遙かに質量が高いという意味で）重荷電粒子とすることで、体内で発生したアルファ線と似た「体内被曝」をもたらす。したがって、媒質内でのガンマ線や中性子線の振る舞いを知るためにには、まず、重荷電粒子線や電子線の振る舞いについて知る必要がある。

ただし、ガンマ線により媒質内で発生した電子線は、原子核の崩壊で発生したのではないので、ベータ線と呼ぶことはできない。また、安易に「体内被曝」という言葉を使うと、本来の体内被曝で重要な問題、取り込んでしまった放射性物質が体内的どこに集中するか、どの程度の時間そこに留まるか、といった生理学的相違を無視することに繋がる。したがって、このような「広く考えてみる」を乱発すると正確な議論ができなくなるので、止めた方が良い。

それでも、ガンマ線の与える媒質に対する作用は、ガンマ線の直接の作用ではなく、それが発生される電子線によるものだという点は、ガンマ線の「強さ」の定義が色々と面倒である理由を納得させてくれる（しかも、その電子線が、新たに光子を発生されることもあるのだから、とことん面倒）。

中性子線

中性子線は、ガンマ線と同じく高い透過性を持ち、また、（ニュートリノのような素通りをしていくものと異なり）身体にとって危険な放射線となる。

当然のことだが、ガンマ線だけでなく中性子線についても、空気による遮蔽効果から始めて、意図的な遮蔽として色々な材質による遮蔽を計算してみるべきではある。しかし、中性子線についての計算には触れない。

計算には触れないが、中性子線の特徴をいくつか述べておこう。

- 中性子線は、可視光線ほどではないにしても、（ガンマ線と異なり）物質の選り好みがかなり高い。例えば、フッ素の原子核は、中性子線の透過を妨げる働きが高い（断面積が大きい）。
- 中性子線は、物質との相互作用によりガンマ線を発生させたり、また、放射性物質を作ったりと、やっかいな働きを持つ。
- したがって、中性子線の被害の評価は、ガンマ線より難しい。

要するに、難しい。さらに、難しいだけでなく、中性子線について触れると、ここまで説明とつじつまの合わない点が出てくる。例えば、250 mで半減としたガンマ線には、中性子線が空気中の窒素に作用することにより生じたものも含まれているなど。

したがって、中性子線には触れない。

6.4.2 初期放射線と残留放射線

ここまで、放射線の遮蔽を問題にしてきたのだが、その放射線がどこから、どの時点で放射されたのかについては、一切触れてこなかった。

これについては、半ば人為的な区別ではあるが、つぎの区別をする。

- 爆発時点から 1 分以内に放射される放射線を、初期放射線という。
 - 特に、爆発とほとんど同時に放射される放射線を、即発放射線という。
 - 即発放射線は、核爆発を発生させた筐体内部から放射される。
 - 即発放射線以外の初期放射線は、火球（の内部に散らばったデブリ）から放射される。
- 爆発時点から 1 分以降に放射される放射線を、残留放射線という。
 - 残留放射線は、しばらくの間は火球から（むしろ上空のキノコ雲の傘から）放射されるが、
 - 被害を与えるのは、キノコ雲内部の、デブリや二次的に発生した放射性物質が地上に降ってきて、人間の近くに来た場合であり、広い範囲の「汚染」から放出される。
 - それ以外にも、中性子線により地上で二次的に作られた放射性物質からも放射される。

残留放射線については、後の章で述べる。

remark. ガンマ線の遮蔽は、主に初期放射線について問題になる。即発放射線については、1点から放射されるのだが、火球からとなると火球の大きさはかなりのものなので、「空気による遮蔽」と言ったときに、「どこの間の空気なのか」ということが問題になり、火球表面が爆心点より近づいているという効果も無視できない。それ以上に、「1分間」という時間に「爆風により空気が薄くなっている」という効果は、かなり大きい。ショック・ウェーブと爆風については、次の章で述べる。

第7章 ショック・ウェーブと爆風

7.1 核爆発のショック・ウェーブ

7.1.1 通常の爆発との相違

通常の爆薬の場合でも、また、核爆発の場合でも単純化して言うならば、エネルギーは熱として解放されデブリがそのエネルギーを引き受ける（核爆発で即時に放射される即発放射線は無視）。そこから「爆発」という現象が引き起こされることになるのだが、大きく分けると

- 周囲の空気も巻き込んでの高圧ガスの膨張による効果
- 膨張の速さが音速を超える場合に発生する衝撃波による効果
- 熱エネルギーのまま、爆発という流体力学的効果には貢献しないもの

となる。核爆発の場合は、熱エネルギーのまま留まても火球からの輻射として被害を与えるが、通常の爆発では、膨張してくるガスが高熱であることの被害は、爆風として与える被害に比べて大きくない。

次に、衝撃波だが、通常の爆発でも衝撃波による被害は無視できないが、それでも被害の主体は膨張するガスの爆風としての効果による。したがって、被害の範囲の目安としては、膨張するガスが埋め尽くす球の体積（半径の3乗）に反比例することになる。

一方、核爆発の場合、火球が地表に触れない高度の爆発である限り、膨張するガスとしての爆風の被害は、事実上存在せず、衝撃波（ショック・ウェーブ）が被害を与えることになる。確かにそうなのだが、ショック・ウェーブは、爆風を発生させるのであり、被害について述べる場合、やはり「爆風の被害」というのが相応しい。しかし、これでは「膨張する高圧ガス」である爆風との区別がつきづらいので、もう少し後でショック・ウェーブが引き起こす爆風について説明するまで、「流体力学的エネルギー」という言葉を用いることにする。

通常の爆発

通常の爆発の効果が距離の3乗に反比例すると仮定すると、これはあまり効率の良いものではない。ただし、膨張してくるガスに意図的に破片が混ざるようにすることも可能であり、また、高熱であるということも、それなりの効果を発揮するので、純粋に爆風としての威力以上の働きをすることになる。

それでも3乗に反比例するということは、爆発の規模が大きく成れば成るほど、効率を低下させてしまうことに変わりはない。

remark. ひとつの解決手段は、「3乗に反比例」は爆発が1点で生じるということに由来するので、これを踏まえて、面での爆発に変更することである。つまり、まず、爆発物を発火させずに比較的低空で円盤状に拡散させてから、同時に点火するという手法であり、この場合、酸素を自前で供給する火薬という燃料を使わなくとも、空気中の酸素と混合させてからのタイミングで同時に点火するこというが可能であり「燃料」として使える材料の範囲も拡がる。

remark. L N G 運搬車両が事故を起こしたときのように、爆発の「燃料」が空気と混ざった状態で地上近くに拡がってから引火した場合の爆発では、爆風のエネルギーの多くが上空に逃げるにしても、今度は、地上は燃焼するガスに覆われているわけであり、高圧と熱による被害が甚大なものとなる。おそらく、塹壕から短いトンネルで通じる地下室に籠もっている程度では、この高圧と熱から逃れることは不可能であろう。

それでも、この高圧と熱が短時間しか持続しないという点は、核爆発のショック・ウェーブに比べれば防御側に有利に働くはずである。

7.1.2 核爆発におけるエネルギー分配率

核爆発では、熱と放射線のエネルギーに分配される率はかなり大きく、熱エネルギー、「流体力学的エネルギー」、放射線のエネルギーの大まかな分配率として、以下の数値があげられている。[McNaught pp 40]

熱エネルギー	35%
流体力学的エネルギー	50%
放射線のエネルギー	15%

熱エネルギーの35%という数値については、この数値を活用して、与えられた地点で受ける熱線の総量を計算することができた。しかし、流体力学的エネルギーを50%という比率から求めてみたところで、被害の定量的評価につながる情報は得られない。

被害の定量的評価につながる情報が得られないという意味では、放射線のエネルギーとしての評価ではもっと甚だしく、実は、核爆発という膨大なエネルギーのうちの15%もの割合が放射線に割り当てられたのでは、熱線や爆風などの効果など比較にならないほどの被害を与えるはずなのである。実際には、放射線のエネルギーのほとんどは、火球内部の空気により吸収され、エネルギーとして評価すれば残りのわずかの部分が、僅かであるにもかかわらず、それでも甚大な被害を与えることになる。結局の所、エネルギーという数値から直接に被害の定量的評価ができるのは、熱線の被害だけなのである。

7.1.3 ショック・ウェーブ

核爆発により火球が生成される段階で、デブリの作る超高压のガスと、輻射の玉突きにより高熱になった空気の両者は、急速に膨張する。その速度は、もちろん音速を超える速さであり、空気は圧縮されショック・ウェーブとして拡がって行くことになる。

ショック・ウェーブは高圧の空気の作る波であり、爆心点から遠方に届くショック・ウェーブの含む高圧の空気は、爆心付近から長い旅をしてきたものではなく、ショック・ウェーブが通過している地点の少し手前にあった空気である。それは、池に落とした石が作る波が拡がって行くように、拡がって行くのである、「拡がって行く波に含まれる水は石が落ちた周囲の水ではない」ということと同じである。

爆心点から来た空気ではない、ということは重要である。もし、爆心点から来た空気なのだとしたら、それは途方もない量の放射性物質を含んでいるのはずであり、核爆発の爆風は「毒の風」と呼ばれることになったであろう。不幸中の幸いだが、そのようなことはなく、比較的遠方に襲いかかるショック・ウェーブは「クリーンな」空気なのだ。

圧力波としてのショック・ウェーブ

ある地点をショック・ウェーブが通過するとき

1. まず、急激に気圧が増加する。
2. それと同時に、爆風が襲いかかる。
3. しばらくの間は気圧は通常より高いが、徐々に減少し、
4. 通常より低い気圧に変わり、
5. 最初の爆風より弱いが、長く続く爆風が反対方向から襲いかかる。

それでは、「流体力学的エネルギー」、「圧力波」、「ショック・ウェーブ」、「衝撃波」、「爆風」ともうひとつ、「ショック・フロント」を加えて、用語（とそのニュアンス）の整理をしよう：

1. 流体力学的エネルギーは、高熱の空気（火球）の膨張のエネルギーと、火球から離れて拡がって行く圧力波のエネルギーの合計である。
2. 圧力波のエネルギーの方が大きいので、流体力学的エネルギーと圧力波のエネルギーを同一としても良い。
3. 圧力波と衝撃波は同じであり、衝撃波とショック・ウェーブは同じことである。
4. ショック・ウェーブは急峻な圧力の立ち上がりをもち、これがショックフロント。
5. ショック・ウェーブとして押し寄せる空気は、高圧であると同時に高速で移動する爆風（blast）でもある。
6. ショック・ウェーブは爆風でもあるので、「ショック・ウェーブと爆風」と言うのは変である。しかし、爆風を「ショック・ウェーブの高圧が発生させたもの」と考えて、「ショック・ウェーブと爆風」という表現を許容することにした。
7. ショック・ウェーブなどと言わず衝撃波と言えば良いのだが、衝撃波という言葉には「一瞬のできごと」というニュアンスがつきまとう。カタカナ語になると特殊なニュアンスを与えることができるという日本語の利点を活かして、あえてショック・ウェーブとカタカナ語にした。
8. 衝撃波という「一瞬のできごと」のニュアンスに該当するのはショック・フロントである。

それでは、ショック・ウェーブの引き起こす現象について調べてみよう。

爆風の発生

ある地点で、ショック・フロントが来た瞬間において、

- その地点より外側の気圧は（ショック・ウェーブがまだ来ていないので）通常と変わらず、
- 内側の気圧は高いので、
- 気圧差により、その地点の空気は外側に押される。

このプロセスにより、その地点の空気は外側に向かって爆風となって吹いて行くことになる、という理屈である。つまり、その地点に襲いかかる爆風は、このプロセスにより、外側に押し出された、少し内側の空気なのである。

同時に、ショック・フロントの全面における内側の高い圧力と外側の常圧との差は、波面の外側の空気を移動させるだけでなく圧縮することになり、衝撃波は外側へと伝搬して行く。

逆相の爆風（振り戻しとして反対方向から襲いかかる爆風）の持続時間が長いということは、それが最初の正相の爆風より弱いということからの、当然の帰結である。

全体としての気圧の低下

それでは、次に爆心点から一定の距離の球面（の地面より上の部分）を想定して、その中に含まれる空気の総量を考えてみよう。ショック・フロントがその球面を通過するまでは、球面内部の空気の総量は、核爆発の影響は受けない。ショック・フロントがその球面を通過するとき（ショック・ウェーブは全方向等速で拡がると仮定している），球面上の各点で爆風はその球面の内側から外側へと吹くので、球内部の空気は、総量として減少し続ける。逆相の爆風により、やがては減少分は回復されるのだが、それまでの間は、球内部の空気総量は通常より少なく気圧は低いということになる。

remark. この球面よりもっと内側ではすでに逆向きの爆風が吹いているのだが、それでも総量として空気量が減っているということには影響しない。

remark. 「逆向きの爆風」というものは、外側への爆風が全体として終わってから一斉に外側から吹き戻すというものではなく、キノコ雲の地上の足の部分が地表を伝って外側へと拡がって行っているかのように見える時点でも、同時に足の根本近くでは、中心に向かって吹き込み足を伝って上がっていくかのような動きが見えることになる。

火球が上空へ移動していくことも、気圧の低下に貢献する。したがって、

核爆発により、周囲の気圧は低下する（空気が薄くなる）

という変化が生じる。これは、空気によるガンマ線や中性子線の遮蔽能力が下がると言うことを意味し、深刻な影響を与える。

7.2 ショック・ウェーブによる被害

7.2.1 静加圧と動圧

ショック・フロントが通過するとき、その地点の気圧は急激に上昇する。この常圧より高い気圧は、内側と外側で常圧のバランスしている閉じた物体に対して、常圧との差に当たる気圧（静加圧）を外側から加えることになり、直接の被害（例えば鼓膜が破れるなど）をもたらす。

もうひとつ、ショック・ウェーブは爆風を伴うのであり、この運動する空気の固まりは、その運動の邪魔となる物体に「風圧」（爆風の圧力）を加えることになる。これを動圧と言う。

動圧は、日常の経験でもなじみ深い「猛烈な風の風圧」であり、どのような被害を与えるかも、容易に想像がつく。ただし、この「猛烈な風」の風速は、秒速 100 m とか 200 m といった値になることもあり、その威力は想像を超える。

静加圧と動圧、及び動圧の原因となる風圧の一例をマクノートから引用する [McNaught pp 101]。

静加圧が 0.68 気圧のとき動圧は 0.15 気圧であり、それは秒速 128 m の風速である。

また、静加圧が直接に人体に与える被害としては

常圧より 0.48 気圧ないし 1 気圧くらい強くなった圧力を受けると、50% の人は耳の鼓膜が破裂するが、それでも彼らすべてが行動不能になるわけではない

ということである。[McNaught pp 112]

つまり、人体に対しては、静加圧の被害より、爆風で身体を吹き飛ばされ叩きつけられる、もしくは、爆風に含まれる様々な破片により致命的な傷を受けるという被害の方が、脅威となるのだ。

それでは静加圧は副次的な問題として片付けて良いのかというと、そうではなく、むしろ静加圧の方が防御が難しいのである。しかし、その前に動圧（爆風）について考えてみよう。

7.2.2 動圧

動圧について考えてみようとは言ったが、実は、これは典型的な流体力学的現象であり、非線形な振る舞いの難しさが端的に現れる。結論を言うと、立ち入らない方が良い。以下の指摘に留め、それ以上は立ち入らない。

- 動圧は、つまり爆風の風圧である。爆風は正面から圧力を加えるのだが、それだけではなく、反射と「回り込み」により、それ以外の方向からの圧力も加える。この解析は難しい。
- 動圧は爆風の風速として捉えれば想像しやすいのだが、その被害は、風速だけではなく、その持続時間にも影響される。
- 一般に、核爆発の規模が大きいほど、同じ最大動圧でも（同じ最大風速でも）持続時間は長くなる。

7.2.3 静加圧

静加圧は、爆風における風速のように経験による体感には結びつかないのだが、静加圧は要するに圧力であり、計算に向いている。

まず、常圧についての計算例から始めることにしよう。

気圧

気圧とは、頭の上に乗っている空気の柱の重さである。その細長い柱の高さは、成層圏の上にまで伸びている訳だが、この柱の高さと空気の比重から柱の重さを求めるとしても、上に行くほど空気の密度は低くなり密度は一定ではないので、簡単な評価はできない。

この空気柱の重さ、つまり気圧を概算する簡単な方法は、片側を真空にした壁に働く力を測定することである（片側を真空にしてしまわないと、壁には両側から力が加わり、見かけ上はなにも力が加わっていないことになる）。

例えば、ポンプで水を汲み上げることの出来る高さと比較してみれば良く、その高さは約 10 m である。ポンプのシリンダーの水に接していない側を真空に近い状態まで減圧して行くと、水は周囲の気圧に押されて上がっててくる。ポンプの位置を次第に高くして行き、それ以上の高さでは水が上がってこなくなる限界の高さにおいて、地面からポンプまで垂直につながれたホースを考える。ホースの上端には気圧は働くかず、一方、下端からは気圧で押されているので、この限界の高さでは、シリンダー内の水の重量とホースの下端の面積に働く気圧が釣り合っているということになる。水の比重は約 1 であり、したがって高さが 10 m で面積 10 cm² の円を両端とするホース内の水の重量は、100 kg でありこれが面積 10 cm² 辺りに働く気圧の概算値となる。

別の言い方をするならば、空気の柱の重さは、高さ 10 m の水の柱の重さとほぼ等しいのである。

力の単位

気圧を水の重さに置き換えて説明したのだが、これは力の大きさを「ものの重さ」で測るという発想に基づく。しかし、物理学での正式な力の単位は、加速度と質量の比例関係により定められるニュートン（記号は N）であり、重さに基づく力の単位（1 kg 物体の重さとしての単位）である 1 kgf (1 kilogram force) との関係は

$$1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N}$$

と定められている。

しかし、「ものの重さ」の方が「加速度を与える力」よりも（地球上で暮らす私たちには）実感しやすいので、ここからも、重さとして表された力 kgf を使って説明を続ける。

標準気圧

低気圧や高気圧という言葉があることからもわかるように、気圧は変動する。そこで、標準として用いる気圧が定められており、それは力の単位としてニュートンを用いて定義されている（パスカルという単位。天気予報では、その100倍にあたるヘクトパスカルが使われる）。これを kgf に換算するのは簡単だが、精度の高い計算をしたい場合には最初からニュートンを用いる方が良い。しかし、ここでは、重さとしての標準気圧を考えて、それが約 10 m の水の柱（の重さ）というアバウトな捉え方で十分である。

それでは、標準の気圧（1 気圧）の力を、その力がかかる面積ごとに求めてみよう。

1. 底面が 10 cm の正方形で高さが 10 m の水の柱の重さは、100 kg であり、
2. この値が 1 気圧の空気柱の重さ、つまり、1 気圧の加える力ということになる。筆箱を象が踏む場合ほどではないにしても、折り紙一枚に体重 100 kg の人が（片足で）立っているようなものだから、なかなかの力である。
3. 1 cm² の面積に加える力は、1 cm² は 10 cm² の 1/100 の 1 なので、1 kg である。1 辺が 5 mm の面積だと、5 mm は 1 cm の 1/2 なので面積は 1/4 であり、250 g の力が加わる。大した力ではないのだが、それでは急激にこの力で押されたときに鼓膜が耐えられるかというと、あまり考えたくない事態である。
4. 1 m² の面積となると、10 cm の場合の $10^2 = 100$ 倍の力であり、10000 kg = 10 トンの力になる。0.5 気圧の加圧でも 5 トンであり、日常触れる範囲のドアでこの力に耐えられるものがあるかというと、どうだろうか。

7.2.4 静加圧の作る爆風

それでは、頑丈な壁で囲まれ開口部が 1 つのドアだけの広い部屋があるとしよう。核爆発のショック・ウェーブが襲いかかることが予想され、ドアを閉めて部屋の中に居るとする。

ショック・ウェーブが来ると、ドアがどの方向を向いているにせよ、ショック・ウェーブの高い気圧がドアを押すことになる。ドアの面積は 1 m² であるとすると、それまではドアの両側から 10 トンの力で押していたわけだが、釣り合っているので実質的には力は加わっていないのと同じであった。こんどは、ドアの外側から押す力

は、ショック・ウェーブの静加圧の分だけ大きく、静加圧がある程度大きければ（例えば静加圧が0.5気圧ならば5トン），それはドアを簡単に開けてしまう（もしくは破壊してしまう）。その結果、部屋の外と中の気圧差により、猛烈な勢いで外の空気が吹き込まれることになり、新たな爆風が生み出される。

ここまででは、ショック・ウェーブのピークの圧力の問題である。ある程度大きな静加圧はドアを破壊し、新たに作られた爆風として吹き込むことになるのだが、それではこの部屋の気圧がどのくらいまで高くなるかというと、それはショック・ウェーブの正相（圧力が高い状態）の持続時間に依存する。これが短い場合、爆風を作り出す静加圧も長くは続かず、部屋の気圧が高くなる前に今度は外へと吹き出して行くことになる。

核爆発のショック・ウェーブは、特に核出力の大きな核爆発のショック・ウェーブは、ピークの圧力が高いだけでなく、持続時間も長い。これは、通常の大規模な爆発との明確な相違であり、通常の爆発ではピークの圧力は人体に致命傷を与える程高いことがあっても、持続時間は短いのである。

水の波にたとえるならば、通常の爆発は、崖崩れにより巨大な岩石の固まりが深い水に落下した場合の「津波」のようなものであり、波高はとんでもない高さになることはあっても、波の「厚み」は大したことではなく、例えばそれが外海に拡がって行った場合には、直ぐにエネルギーを失い消えてしまう。また、堤防でその波を崩すことが出来たならば、「後詰め」を伴わない波の戦力は尽きてしまい、平地をどこまでも進んでくる心配はない。

一方、核爆発のショック・ウェーブは、広い範囲の海底の変形により引き起こされる津波のようなもので、圧力の高いピーク（ショック・フロント）の後ろには、ある程度圧力の高い空気の固まりが続いているのであり、静加圧は持続する。そのため、ドアが破壊され静加圧により引き起こされた爆風が吹き込んでくると、広い室内も、外と同じ静加圧を持つようになる。したがって、もしこの広い部屋がドアで閉じられた地下室に続いている場合、そのドアも破壊され地下室に爆風が吹き込むことになり、それでもショック・ウェーブ本体の静加圧が続いているならば、さらに奥の部屋のドアも破壊され……とどこまでも静加圧は侵入してくる。

これを防ぐ手段は2つしかなく、1つは静加圧のピークに耐えられるほどの頑丈なドアでくい止めることであり、もう1つは、広い部屋と細い通路（真っ直ぐでなく曲がっている方が良い）の繰り返しにより（可能ならば貧弱なシャッターでもよいので、わずかでも時間を稼ぐことにして）、ショック・ウェーブの正相が終わるこ

とを願う、という手段である。東京の地下鉄は、なかなか良く出来ていると思う。

7.3 ショック・ウェーブの伝搬

7.3.1 最も単純な描写

ショック・ウェーブへのエネルギー配分は核出力の 50% と評価されているので、ショック・ウェーブのエネルギーを見積ることは可能である。ただし、後で見るように、ショック・ウェーブによる被害はこのエネルギーと、なんらかの定数で比例関係にあるというわけではない。それでも、ショック・ウェーブにより到達地点へ運ばれるエネルギーは、もちろん、被害の程度の評価をする手がかりになる。

地表での反射

ショック・ウェーブは熱線と同じく、爆心点から球面状に拡がって行くので、熱線の場合と同じく、距離の 2 乗に反比例して弱まるとみなすことができる。その点では、熱線と似ているのだが、

ショック・ウェーブは、地表面で反射される

という点で、熱線のケースと根本的に異なる。喻えるならばショック・ウェーブの振る舞いは、地表が鏡で出来ている場合の熱線の振る舞いと似ている、ということになる。

非線形性

地表が鏡で出来ていたとしても、熱線の振る舞いは、大して複雑にならない。地表について対称な爆心点の位置において、同時にもう 1 つの爆発があったとして両者の影響を合成すればよいだけのことだ。しかし、ショック・ウェーブの場合では、状況は遙かに複雑である。

1. まず、ショック・ウェーブは地表で完全に反射されるのかと言うと、そうではなく、地表の「柔らかさ」や、地表の細かい凹凸などにより不完全な反射になる。もちろん、この解析には豊富なデータが必要であり、また、複雑である。

2. 熱線を瞬間的パルスとして放った場合、それが拡がって行って遠くの地点に届いたときでも、瞬間的パルスとして観察される。

しかし、ショック・ウェーブの場合、その前面での立ち上がりは依然として急峻な状態を保っていたとしても、その後に続く高圧部分の厚みは増してゆき（したがって前面でのピークの圧力はその分だけ減り）、ショック・ウェーブの形はしだいに鈍くなる。この解析も難しい。

3. ショック・ウェーブは、圧力波であっても、空気は爆風となってある程度の距離を移動する。また、熱線の通過により空気は（透明とは言っても）多少は加熱され、遅れて通過して行くショック・ウェーブの振る舞いに影響する。

したがって、有名な（もしくは難しいことで悪名高い）マッハ茎などという現象の解析が必要になり、要するに難しいのである。このような難問に遭遇したときに推奨される態度は、

ショック・ウェーブの流体力学的振る舞いは本質的に非線形性をもち、解析が困難である

と言って、とりあえず「畏敬をもって遠ざける」ことである。

7.4 距離との関係

「衝撃波と爆風」の被害が爆心点からの離れるにしたがって減衰していく様子を、数式により表したいのだが、困ったことに

爆風の被害の定量化は難しい。

そのため、定量化を避けて減衰の度合いを言い表す「減衰の相似比」という見方が必要になる。

7.4.1 減衰の相似性

減衰のタイプ

例えば、

2乗に反比例して減衰するケース

$$\frac{C_2}{r^2}$$

について考えてみよう。ここで、

r の値を 2 倍にすると、 $\frac{C_2}{r^2}$ の値は $1/4$ になる。

しかし、このような表現が成立するためには、その前提として

ある効果が別の効果の 4 分の 1

といった定量的な評価が定められていなければならない。

これは、例えば熱線の照射のケースならば、「単位面積に照射される熱線のエネルギー」という評価が可能なので問題はないのだが、衝撃波と爆風のケースでは、定量的評価は難しい。

remark. 例えば、爆風の強さを評価するために

地面に伏せた人間の 50% が吹き飛ばされる強さ

という基準を設けたとする。これは定量的な評価と言えば定量的なのだが、「それではその 2 倍の強さは?」と言われると、評価のしようがない。

一方、効果の評価値まで踏み込みます、

異なる場所での同じ効果

というだけを問題にするならば、定量的評価を確定させることは必須ではない。

熱線の場合

まず、熱輻射という定量的な評価が確定している場合について、「相似性」の表現に書き換えてみよう。

この場合、減衰のタイプは 2 乗に反比例するケースであり、爆心点から斜距離 r の地点で単位面積が受け取る熱エネルギー P は

$$P = \frac{C}{r^2}$$

の形をとる。ここで定数 C （減衰のタイプを比較するとき C_2 と書いた定数）は、核爆発の出力、熱エネルギーへの分配率、円周率その他により決まり、核出力を W とすると

$$C = \text{定数} \times W$$

の形で表される。

いま、

1. 核出力 W_1 の核爆発の爆心点から斜距離 r_1 の地点で受ける熱照射（の総量）と、
2. 核出力 W_2 の核爆発の爆心点から斜距離 r_2 の地点で受ける熱照射（の総量）

が同じであるとすると、等式

$$\frac{\text{定数} \times W_1}{r_1^2} = \frac{\text{定数} \times W_2}{r_2^2}$$

が成り立ち、両辺の「定数」は等しいので、

$$\frac{W_1}{r_1^2} = \frac{W_2}{r_2^2}$$

であり、この式は

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

と書き換えることができる。ポイントは、

この式には、もはや「ある地点で受け取る単位面積あたりの熱照射の総量」といった定量的評価は現れない

ということだ。この等式は、

核出力を何倍かすることと同じ効果となる斜距離はどう決まるのか

という「同じ効果」ということのみについての主張であり、効果の数値化には踏み込んでいないのである。

相似性

「核出力を何倍かすると ……」という設定なので、もう少し等式を書き換えて

$$\frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{1/2} \quad (7.1)$$

としておく。

この等式の意味は、

核出力を (W_1 から W_2 に) k 倍すると、同じ効果を与える距離は $k^{1/2}$ 倍になる

ということである。

一般に、核出力 W と爆心点からの斜距離 r に依存して決まる何らかの効果について、

1. その効果の減衰の仕方が、定数 α を用いて

$$\frac{\text{定数} \times W}{r^\alpha}$$

の形で表されているならば、

2. 核出力 W_1, W_2 のそれぞれの場合で同じ効果となる距離 r_1, r_2 について、等式

$$\frac{W_1}{r_1^\alpha} = \frac{W_2}{r_2^\alpha}$$

が成り立ち、よって、

3. 等式

$$\frac{r_2^\alpha}{r_1^\alpha} = \frac{W_2}{W_1}$$

を得る。

4. この両辺を $\frac{1}{\alpha}$ 乗すると

$$\frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

であり

核出力 W_1, W_2 と (同じ効果を与える距離) r_1, r_2 の間に

$$\frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{1/\alpha}$$

という関係が成り立つ。

つまり、同じ効果を与える距離は

- 距離の 2 乗に反比例の形で減衰するタイプでは、 W の $1/2$ 乗に比例
- 距離の 3 乗に反比例の形で減衰するタイプでは、 W の $1/3$ 乗に比例

ということであり、例えば、効果が距離の 3 乗に反比例する形で減衰するタイプでは、 W を $1000 = 10^3$ 倍しても、同じ効果を与える距離は 10 倍にしかならない。

remark. 効果が r^α に反比例するケースを扱ってきたが、ガンマ線の減衰は、ある意味でこれらのタイプよりも急速に減衰する。

7.5 計算式

7.5.1 「衝撃波と爆風」の被害についての相似性

相似性の式

衝撃波と爆風の被害については

$$\frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{0.4}$$

という相似性が成り立つ (とされている)。このケースでは、「被害の定量化」は難しいのだが、もし定量化され何らかの数値で記述するならば、それは

距離の $(1 \div 0.4 =) 2.5$ 乗に反比例して減衰する

ということになるはずである。

理論的な理解は難しいので、なぜそうなるかということは問わずに、結果のみでがまんすることにしよう。また、「核出力に依存する最適な高度での空中爆発」のみに限ることにする。

色々な相似性

熱線の場合、1キロトンの核爆発から斜距離で R キロメートル離れた地点と同じ熱線の総量を、 W キロトンの核爆発から受ける斜距離は $R \times W^{1/2}$ キロメートルであった。このような「相似」の関係を、ショック・ウェーブについて述べると、次のようなになる。[McNaught pp 114], [ENW, pp 100-102]

爆発高度 h mでの1kt(TNT)の核爆発から、斜距離 R kmの地点で受けるショック・ウェーブの最大静圧を P とする。このとき、爆発高度 $h \times W^{1/3}$ mでの W kt(TNT)の核爆発から、斜距離

$$R \times W^{1/3} \text{ km}$$

の地点で受けるショック・ウェーブの最大静圧は、同じく P である。ただし、正の静圧や爆風の継続時間は、1kt(TNT)の場合の

$$W^{1/3} \text{ 倍}$$

になる。

つまり、爆発の規模が W 倍になると、

- 同じ強さのショック・ウェーブが来る地点の斜距離は〔爆発高度を調整すれば〕 W の3乗根に比例して大きくなり、
- その地点での継続時間も W の3乗根に比例して長くなる

ということである。

計算例 27. 1kt(TNT)の核爆発から斜距離2kmの地点で受ける最大静圧と同じ最大静圧を、1Mt(TNT)の核爆発（高度はうまく調整されているとする）からは斜距離

$$2 \times 1000^{1/3} = 20 \text{ km}$$

の地点で受ける。つまり、同じ最大静圧を与える斜距離は10倍にしかならない。ただし、その地点での爆風の継続時間は10倍になる。

remark. これらの関係は、最大静圧等の定量化された数値に基づいているのだが、爆発高度を調整するという変更も隠れているので、相似性で表している。核出力以外に爆発高度もパラメータとするならば、定量的評価も可能。

被害の評価

それでは、被害と W の関係はどうなっているのかということだが、ある地点での被害は

- 最大静圧が高いほど大きく、
- 継続時間が長いほど大きいのだが、
- 最大静圧と継続時間から単純に計算されるわけではない。

したがって、核出力 W と被害の「相似性」も、経験的な関係として与えてしまうよりない。同じ最大静圧を与える距離は、たとえば $W = 1000 \text{ kt(TNT)}$ の場合でも 10 倍にしかならないのだが、継続時間が長くなるので、10 倍よりは距離が伸びると予想される。一方、エネルギーが R^2 に比例して等分配されていくことを考えると、 $W^{1/2} = W^{0.5}$ より大きくなるとは思えない。結果は、高度を調整すると、同じ被害を与える斜距離は、

$W^{0.4}$ に比例して伸びると考えるのが妥当

とされている。[ENW, pp 115]

つまり、ショック・ウェーブ（とその引き起こす爆風）の被害については、核出力 W_1, W_2 の核爆発からの被害が同じになる斜距離 r_1, r_2 は、

$$\frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{0.4}$$

となる。

remark. 熱線の被害のケースと異なり、被害の定量化をしているわけではなく、あくまでも「同じ被害」について述べているだけであることに注意。

7.5.2 計算例

それでは、

地面に伏せている人間の約半数が爆風により吹き飛ばされてしまう

ということを「同じ被害」の指標として、距離を計算してみよう。ただし、核出力 W から直接に被害を計算することはできない。計算の出発点として、少なくとも 1 つの例が必要になる。ここでは、

$W_1 = 1 \text{ kt(TNT)}$ の核爆発では, $r_1 = 350 \text{ m}$

という例を基にして計算する。[McNaught pp 113]

計算例 28. 地面に伏せている人間の約半数が爆風により吹き飛ばされてしまう距離は, 核出力 W_2 が

$25 \text{ kt(TNT)}, \quad 1 \text{ Mt(TNT)}, \quad 10 \text{ Mt(TNT)}$

の場合, それぞれ, 関数電卓を用いて計算すると

$$25^{0.4} = 3.624, \quad 1000^{0.4} = 15.85, \quad 10000^{0.4} = 39.81$$

なので, これに 350 をかけて

- 20 kt(TNT) では 1.27 km
- 1 Mt(TNT) では 5.55 km
- 10 Mt(TNT) では 13.93 km

となる。

remark. 半数が吹き飛ばされるということを「同じ被害」の指標とすることは, 特に根拠はなくマクノートの「核兵器」でも明言しているわけではない。ただ, 1 Mt(TNT) の場合の値としてあげられている数値 5800 m [McNaught pp 113] とはマッチしているので, おそらく, 目安として不適切なものではないと思う。また, 「吹き飛ばされる」という効果は, 瞬間風速と持続時間の両方に依存するので, その意味でも趣旨に適っていると言える。

被害の範囲

ここまで,

- 2乗に反比例して減数するタイプの, $1/2$ 乗で距離が伸びるタイプ
- 0.4 乗で距離が伸びるタイプ
- $1/3$ 乗で距離が伸びるタイプ

などのタイプがあった。0.5, 0.4, 0.3333 という数値には大きな違いがないように見えるが、1 kt(TNT) から 20 kt(TNT), 1 Mt(TNT), 10 Mt(TNT) と大きく場合のようには、

1, 20, 1000, , 10000

という比が大きく異なる場合には、0.5 倍, 0.4 倍, 0.33 倍の違いはかなり顕著である。

W	$W^{1/2}$	$W^{0.4}$	$W^{1/3}$
1	1	1	1
20	4.47	3.31	2.71
1000	31.6	15.8	10
10000	100	39.8	21.5

熱線とショック・ウェーブ・爆風の効果の有効距離は、核出力を K 倍したときに、それぞれ $K^{1/2}$ 倍と $K^{0.4}$ 倍に伸びる。したがって、例えば（極端な例だが）核出力を 10000 倍した場合に熱線とショック・ウェーブ・爆風の被害の及ぶ距離は、100 倍と約 40 倍という違いが生じるということになり、

核爆発の規模が大きいほど、熱線の被害の範囲はショック・ウェーブ・爆風の被害の範囲に比べて大きくなっていく

ということわざがある。

第8章 残留放射線

この章では、ものごとは数理の枠組みから離れてしまっている。計算という土俵に乗る式は、

7倍で $\frac{1}{10}$ ルール

のみ。しかし、それでは、理系的な理解ではなく文系的な理解の世界なのかというと、まったく逆である。理系的な理解というものは、必ずしも数式によるものではないのだ。しかし、日常言語から遠い、数式による記述を誤解することは難しい一方、日常言語に近い表現での記述を誤読することは、至って簡単である。したがって、誤解を避けようとすると、くどい説明に成らざるを得ない。

それでは、まず「1分後」という基準で残留放射線を定義する所から始めよう。
爆発から1分より後に発生する放射線を残留放射線という。この「1分後」という基準には、特別な根拠はないのだが、以下の点に着目して、一応の目安としている；

だいたい1分程度経過すると、火球内部の放射性物質から放射される放射線は弱まり、上空に上昇した火球からの放射線は大きな脅威ではなくなる。それが再び脅威となるのは、放射性物質が上空で冷やされて地上に戻ってきてからである。

8.1 放射能

8.1.1 初期放射線と残留放射線

核爆発により発生する放射線を、

1. 核爆発から1分以内に発生する放射線
2. それ以降に発生する放射線

に分けて考える。1分以内に発生する放射線を、さらに、

1. 核爆発の核反応により、核爆発と同時に発生する即発放射線
2. 核反応により生成された放射性物質の放つ放射線

に分けることもできるが、話を簡単にするために、ここでは、即発放射線、および、即発放射線が地上の物質に作用して（核爆発とほぼ同時に）発生する二次的な放射線のことは、考えないことにする。したがって、

初期放射線　火球内部にある放射性物質が1分以内に放つ放射線。半減期が短く、したがって、強い放射線を放つために（強い放射能をもつために）火球の中にあっても脅威となる

残留放射線　地上に降下してから脅威となる比較的半減期の長い放射線物質から放たれる放射線

と分けることができる。

8.1.2 放射線・放射性物質・放射能

用語

放射線、放射性物質、放射能という言葉についてだが、まず、放射能は、放射線や放射性物質のどちらとも意味が違う言葉であり、

放射線 ガンマ線・中性子線・ベータ線・アルファ線といった「飛んでくるもの」

放射性物質 放射線を放つ物質、つまり、「飛んでくるもの」の発生源

放射能 放射性物質が放射線を放つ能力

と、使い分けをはっきりさせておこう。

さて、ここで、「脅威となる」のはなにか、という問題が生じる。初期放射線に関して「強い放射能をもつ」は火球内部の放射性物質について言っていることだが、火球から遠く離れて地上にいる生き物にとって脅威となるのは、そこから放たれた放射線であろう。とは言っても、

「拳銃の脅威」なのか、「拳銃が脅威なのではなく、拳銃から発射される銃弾が脅威」なのか、それとも「銃弾を発射する拳銃（という物体）の能力が脅威」なのか

を問題にしているようなものなので、気にしないでも良い。

一方、「放射性物質が放つ残留放射線の脅威」となると、これは微妙。遠く離れた火球の中にではなく、放射性物質は直ぐそこに存在するのであり、例えば、窓の外の道路や屋根の上、衣服についた変なゴミ、皮膚に張り付いた灰のようなもの、喉がヒリヒリするほこり、といった「直ぐそこにある存在」であり、体内被曝に至っては言葉そのままに体内に存在する。家の外の道路にある放射性物質については、脅威となるものは壁や窓をすり抜けてくる放射線であると言い切れる。一方、

皮膚についた灰のようなもので火傷するのは、灰の中の放射性物質が放つ放射線が皮膚の表面で吸収されるためなので、これも放射線の脅威

と言ったところで、実感に乏しい。さらに体内被曝となると、体内に取り込んだ放射性物質の放つ放射線の脅威と言っても、なおさら実感に乏しい。つまり、

残留放射線というよりは「残留放射性物質」そのものの脅威と考えたい
という面もある。こうなると、すぐそこの道路にある、しかし体外にある存在と。
体内にある存在の両者をカバーできる「放射能」の出番であり、

地上に降下してから脅威となる比較的半減期の長い放射能

という、妙にしつくりくる表現が活躍することになる（のだろうか？）

「放射能」の脅威

「便利な用語」という点では「放射能」という言葉は使い勝手が良く、したがって乱用されてきた。しかし、絶対に混同してはいけない場合もある。その典型は、

遮蔽の計算が不十分で、基準値以上の放射線が計測された

ということを

放射能が漏れた

と言い換えることであり、これは容易に

放射性物質が漏れた

という意味、つまり周囲が汚染された、という意味に誤解されることになる。

「放射線が漏れた」場合であっても、その放射線により二次的な放射性物質が作られてしまうほど強力でない限り「放射能汚染」は生じない。「漏れた放射線」（遮蔽の計算が不十分だったケースでは極めて微量）に直接に接した人の将来の確率的リスクが僅かに上昇する、という程度の「被害」なのであり、多くの場合、国内線の飛行機に一度乗る放射線被曝よりも低い。

それにも関わらず、「放射能」という言葉だけで、多くの風評被害をもたらす。原因は、

- ひとつには、程度を見積もる定量的感覚（定量的と言うほどのものでなく、10の個数を数える感覚なのだが）の欠如であり、
- もう一つは、放射線と放射性物質を「放射能」という言葉により混同すること

である。「定量的感覚」については、今のところは諦めるほかはなさそうであり、おそらく、小学校の教育から「東京ドーム」を追放して「10の個数を数える」教育を行わない限り、改善されることはないであろう。ただし、教育課程の変更を行っても、教える側の能力（むしろ感覚）が伴わないことには、失敗は目に見えている。

一方、「放射能」については、なるべくその言葉に頼らずに「放射線」と「放射性物質」を使い分ければ、誤解は避けられそうだ。とは言っても、本当に「誤解」なのか、「意図されたすり替え」なのか、「意図的な誤解への誘導」なのか状況は様々であり、したがって対処は難しい。もう少し好意的に考えるならば、価値判断と結びついている「文系的世界」は、価値判断から離れて分析する冷たい分析から遠いゆえに、結論が先行してしまうだけなのかも知れないが。

このような背景があるので、「放射能」という言葉を不用意に使うと、（普段は部外者の間違いには寛容なはずの）専門家の機嫌を損ねることになるので、注意が必要である。

放射性物質からの放射線は、その放射性物質に含まれる原子核が崩壊（壊変）することにより放たれる。対象として考えている放射性物質全体において、単位時間あたりに放射線を放つ崩壊が発生する回数を、その放射性物質の放射能という。

remark. 注意すべき点は、一回の壊変で複数の放射線が放たれる場合もあるということ。例えば、コバルト 60 がニッケルに崩壊する過程では 0.328 MeV のベータ線と、1.17 MeV, 1.33 MeV の 2 本のガンマ線が放たれる。したがって、コバルト 60 からニッケルへの崩壊を 1 回と考えるならば、ガンマ線に限っても 2 本のガンマ

線（2個の光子）が放たれることになる。セシウム137からバリウムへの壊変の場合には、その崩壊によって放たれるガンマ線は、壊変の途中の励起状態にあるバリウムから放たれるものがほとんどなので、「セシウム137の放つガンマ線」というと絡まれるかも知れない。「セシウム137からバリウム137への壊変により放たれる放射線」と言っておくのが無難。要するに、放射能として数えている回数は、「どこからどこへ」を指定しての壊変を数えているということ。

半減期

放射性物質の放射能は時間と共に弱くなり、放射能は減って行く。一般に、同じ種類の（原子核から成る）ある放射性物質の放射能が2分の1になるまでの時間は、

1. 一定であり、
2. 放射性物質のみに依存し、
3. どの時点から（半分になるまでの時間を）計測するかには依らない。

例えば、半減期が5秒ならば、放射能（の強さ）が測定開始時点の

- 半分になるのは測定開始から5秒後
- $1/4$ になるのは測定開始から10秒後
- $1/1024 = 1/2^{10}$ になるのは測定開始から50秒後

ということになる。

半減期の値からは、特定の時間における放射線の強度は求められない。半減期は、特定の時間における強度が、どのくらいの時間で2分の1になるかを言っているだけで、強度の比にしか関わらない。

一般に放射性物質は、

それを構成する元素の原子核のなかで不安定なものが、別の原子核（もしくは別の状態の原子核）に「崩壊」するに伴って放射線を放つ

というメカニズムで「放射性」なのであり、この崩壊が進むにつれ、不安定な原子核の比率は減って行く。そして、この比率が半分になるまでの時間が、半減期なのである。したがって、

- 「不安定な」原子核の「不安定」な度合いが強い場合には、短い時間で沢山の不安定な原子核が崩壊し、
 - 放射能は強く
 - 半減期は短い
- 逆に、「不安定」な度合いが小さいときには、崩壊は少しづつしか進まないので、
 - 放射能は弱く
 - 半減期は長い

ということになる。つまり、半減期が短いものほど放射能は強い。

放射能と危険性

ありがちな表題だが、「放射能は恐ろしい」と力説しようとしているわけではない。核爆発による放射線被害は、力説する必要もなく、恐ろしい。そのような自明なことを言いたいのではなく、「半減期が短いほど放射能は強い」という曖昧な解釈を許容する説明での

1. 「放射能が強い」という「強い」と、
2. 「放射能の危険性の度合い」

との関係について説明したいのだ。

半減期との関係で「放射能の強さ」と言った場合の「放射能の強さ」は、単位時間当たりに放射される放射線の量のことであり、つまりその時点における放射線の強度である。これは、その時点での瞬間的危険性（つまり短時間その放射性物質に近づいたときの危険性）を意味する。

それでは、半減期の長い放射性物質はと言うと、たとえば有名な「プルトニウム」（プルトニウム 239）があり、その半減期は 29000 年である。したがって、プルトニウムの（小さな）塊の置かれた部屋に入ったとしても、「ただちに危険はない」だけでなく「危険はない」。それでは、プルトニウムがばらまかれても危険はないのかというと、そうではなく、「ばらまかれる」という状態によっては「それを体内に取り込んでしまう」という内部被曝の危険性がある。単位時間あたりの危険性は低くとも、長時間にわたって曝されることになると、全体としての危険性が高くなる可能性がある。

それではどのくらい危険かと定量化しようとすると、これは「どのくらい体内に居座るのか」、「身体のどの部分に取り込まれるのか」などの問題が絡み、難しい。そもそも、プルトニウムは重金属であり、もしかすると、放射能よりも毒性の心配をするべきかもしれない。なお、プルトニウムには、自発核分裂により中性子線が放たれるという危険性があり、また、悪用される危険もあるが、それはまた別の問題である。

要するに、この辺りまで来ると、もはや物理の問題と言うよりは医学の問題であり、「計算する」という土俵にからは遠い。放射能（つまり、放射性物質）が皮膚の表面についたり、吸い込んだり、体内に取り込まれた場合については、触れないことにして、残留放射性物質が「窓の外の道路」にある場合の評価に限定することする。ただし、ひとつだけ；

体内被曝に関しては、放射性物質そのものの半減期よりも、むしろ、生体半減期という数値の方が重要（たぶん）

ということだけ指摘しておこう。

原子炉事故

もう一つ、原子炉の事故について。それでは、

1. 数日前に運転を開始した原子炉が、運転中に破滅的な事故を起こした場合
2. かなりの期間、運転を続けてきた原子炉が緊急停止してから一週間後に、破滅的な状況となった場合

という2つの場合のどちらがより困った事態なのだろうか。「破滅的」は、放射性物質を閉じ込められず、ほとんどすべて拡散させてしまうこととする。

結論から言うと、数日間しか運転していない原子炉の場合、そこにある放射性物質はその数日間に発生したものだけであり、半減期の短いものも多く含む。したがって、事故時点での放射能は極めて高く、極めて危険である。しかし、半減期が短いということは急速に放射能が弱まるということであり、ある程度の時間が経つと相対的に危険性はなくなり、今度は半減期の長い放射性物質が長期的な汚染を引き起こすものとなる。ただし、数日間の間だけしか運転を続けていないので、半減期の長い放射性物質は蓄積されていない。

逆に、長期間運転を続けてから停止した原子炉の場合、半減期の短いものについては、運転を停止してからの一週間の間にかなり弱まっていて、また、半減期の短いものは（半減期が短いので）蓄積されていく心配がない。ところが、半減期の長い放射性物質は、放射能が弱まるのに長時間が必要だということが効いてきて、どんどん蓄積されていってしまう。したがつて、長期間運転を続けた原子炉の格納器内部とその周辺（使用済み燃料貯蔵プール）には、大量の（半減期の長い）放射性物質が存在する（再処理工場も同様）。これらは瞬間的な「放射能」は弱いのだが、大量に存在するので拡散した場合、深刻な汚染を引き起こす。しかも、その汚染は長時間継続するのであり、回復は難しくなる。

このような「最悪の拡散」が生じてしまった場合、どの程度「最悪」なのは、放出された総量よりも、むしろ、拡散の仕方に依存するのかも知れない。また、広範囲に広く汚染される場合と比較的狭い範囲がひどく汚染される場合と、どちらがましなのかという問題も、答えようがない。ただし、以下は、核爆発と比較する上で大切であろう。

核爆発による残留放射性物質は、成層圏まで運ばれてから広い範囲に降ってくるという形をとるが、原子炉への通常兵器による攻撃では、そこまでの高度まで達する爆発にはならない。ましてや、いわゆる再臨界などでは爆発と言えるレベルになるかも疑問。

しかし、特に長期間運転を続けた原子炉の場合、汚染の主要部分は長期的汚染を引き起こす半減期の長い放射性物質である。一方、核爆発の残留放射性物質は、半減期が比較的短いものを多く含むので、短期間で弱まると期待できる。

remark. 核爆発よりも、長期間運転を続けた（かつ、原子力発電所の原子炉のような出力の高い）原子炉の方が半減期の長い放射性物質を多く蓄積している。このことの前提は、核爆発よりも原子炉の方が、長い時間をかけてだが、多くの核分裂物質を消費している、ということである。これは、原子力発電所の発電能力をエネルギーに換算して評価してみれば確かめられる。広島や長崎クラスの原爆は、それが与えた被害とは裏腹に、エネルギーとしてはそれ程大きくはないのだ。

8.2 残留放射線の減少の速さ

8.2.1 7倍で10分の1ルール

式の意味

残留放射線の発生源となる残留放射性物質は、つまり、地上に降ってきた「死の灰」は、様々な半減期の放射性物質を含む。したがって、どのくらいの時間で放射能が半減するか評価しようとすると、半減期ごとの放射性物質の割合を調べ、それから各経過時間ごとで積算して評価しなければならない。したがって、まともに評価するのは難しいのだが、核分裂から発生した放射性物質については、つぎの経験則が知られている。

爆発時点からの時間が7倍になると、放射線量率は10分の1になる

この経験則は、核分裂生成物質という様々な半減期の放射性物質の混合物について、実験により、線量率の減衰の仕方が

$$\frac{1}{t^{1.2}}$$

に形であることが知られているためであり、式

$$\frac{1}{(7t)^{1.2}} = \frac{1}{7^{1.2} t^{1.2}} = \frac{1}{10.33 t^{1.2}}$$

において 10.33 を 10 に置き換えて得られる。

重要な点は、

1. 放射能は時間と共に確実に弱くなる。
2. しかも、時間に反比例して弱くなるのではなく、時間の 1.2 乗に反比例して弱くなる。 t と $t^{1.2}$ の比は、例えば $t = 100$ のとき $t^{1.2} = 251$, $t = 1000$ のとき $t^{1.2} = 3981$ であり、時間が経つほど「1.2 乗に比例」ということが効いて来る。
3. 残留放射性物質のような半減期の異なる色々な放射性物質が混ざったものではなく、单一の半減期の放射性物質では、半減期を λ とすると

$$\frac{1}{2^{t/\lambda}}$$

の形で減衰し、例えば $t = 10\lambda$, $t = 100\lambda$ と時間が経過すると、

- (a) $2^{10} = 1024$ なので約 1000 分の 1 ,
- (b) $(t^{10})^{10}$ は 約 $(10^3)^{10} = 10^{30}$ なのでほとんど無視できる値

と確実に「無視できる値」まで下がることと対照的に,

4. 残留放射性物質の場合, ある程度の危険性は残り続ける。

最後の「指數関数的減少ではなく危険性は残り続ける」という原因是,

- 時間が経過するに従って個々の放射性物質の放つ線量は減衰するのだが,
- それでも減衰の仕方が極端に遅い（つまり半減期が長い）放射性物質は, まだ生き残っているのであり,
- 半減期の長いものの比率により $t^{1.2}$ という減少の仕方が決まる

ためである。半減期の長い放射性物質ほど, 最後まで放射能の脅威として残る。もちろん, 数十億年という「極端に半減期の長い放射性物質」も減衰し始めるほどの時間が経過すれば別だが, これは余り意味がない。

以上, 理屈は $1/t^{1.2}$ のだが, 「7倍で 10 分の 1」は使いやすい。それでは, 具体例を見ておこう。

計算例

計算例 29. 核爆発から 6 時間後に, 屋外での線量率は

$$0.2 \text{ Sy/h}$$

(1 時間当たり 0.2 シーベルト) であったとして, 爆発から 42 時間後の線量率を予測する。

6 時間後の屋外で受ける放射線は, 地上に降下してた残留放射性物質（と初期の中性子線により作られた放射性物質）からのものである。その時点より後にも, 上空から降下して来る「死の灰」も残っている可能性はあるが, ここでは, ほとんどないものとして計算する。

後は, 「7倍で 10 分の 1」を使うだけのことで, 42 時間は 6 時間のちょうど 7 倍なので, 0.2 シーベルトの 10 分の 1, 每時 0.02 シーベルトという線量率になると予想される；

核爆発から 42 時間後のその地点での線量率は

$$0.02 \text{ Sy/h.}$$

remark. 每時 0.02 シーベルトという値は毎時 20 ミリシーベルトであり、平時の安全基準が年間で数ミリシーベルトというレベルで設定されることを考えると、大きな値ではある。しかし、

- 安全基準の数値は、その値の被曝が継続することを前提としての値であり、
- 7 倍で 10 分の 1 で下がり続けるケースでは、 $42 \times 7 = 294$ 時間経過すれば毎時 2 ミリシーベルトまで低下する。

remark. 参考までに、一年間という時間を、時間と秒に換算した値は

時間に換算 8.76×10^3 時間 (8760 時間)

秒に換算 3.1536×10^7 時間、 約 3×10^7 時間

この数値（細かい数値ではなく特に 10 の個数）は、線量率計の毎時マイクロシーベルトを年単位の値に直すときなどで便利であり、

$$1 \text{ ミリシーベルト} = 10^3 \text{ マイクロシーベルト}$$

なので、

「マイクロシーベルトをミリシーベルトに読み替えて、8.76 をかける

とすればよい。なお、ハンディーな計測器で測っている場合には、測定器の調整がされているとは思えず、また、測る場所、高さなどでかなり値がぶれるので、8.76 などという数値を用いる意味はなく、10 倍する程度が妥当。

それでは、爆発時点から 6 時間後からの「将来にわたって長期間」の（屋外での）被曝積算量を概算してみよう。概算として等比級数の和の公式で計算してみることもできるのだが、むしろ $t^{-1.2}$ の積分で計算してしまった方が簡単である。結論だけ言うと、一般に、

核爆発から t_0 時間後に、残留放射性物質からの被曝が（1時間当たりの線量率で） C_0 Sy であったとする；

$$t_0 \text{ 時間後の時点で } C_0 \text{ Sy/h.}$$

ただし、経過時間 t_0 は、残量放射性物質がすでに地上に戻って来ていると見なせる程度の時間であると仮定する。周辺の残留放射性物質が全く除去されない場合（そして新たに降下してくるものが無い場合）、その時点から将来にわたっての被曝の総量は

$$5C_0 t_0 \text{ Sy}$$

となる。

上の例では、

$$t_0 = 6 \text{ h}, \quad C_0 = 0.2 \text{ Sv/h}$$

なので、 $5 \times 0.2 \times 6 = 6 \text{ Sv}$ という値が得られる。

remark. しかし、この例での 6 シーベルトという値は、微妙な値である。短時間で被曝したならば致死的な線量であり、おそらく、屋外でまともに被曝し続けたならば、死ぬことになりそうである。屋内に留まるならば、木造の家屋であっても、壁による遮蔽が効くので、助かる可能性もある。これもガンマ線の波長等に依存するのだが、空気は数百メートルで大抵のガンマ線を半減されることを思い出して欲しい。また、空気の質量は水の約千分の 1 でありガンマ線の遮蔽は質量が効いてくることを考えると、ちょっとした壁でも家屋の中に居れば、被曝は半分以下になると期待できそうである。

remark. 一方、この計算では 6 時間後からの被曝しか考慮していない。6 時間後でこの値となるようでは、6 時間前よりも早い時期に「死の灰」が降ってきていたならば、まず助からない。

remark. 最後に、「不幸中の不幸」を：

残留放射線がこのような値になる地点では、熱線・爆風・初期放射線が確実に致命的であり、残留放射線はもはや生死にほとんど関与しない。残留放射線が死因となり得るのは、後からそこに入った人たちにとってのみであろう。

結局の所、核爆発の被害は「不幸中の不幸」に満ちているのだ。

体内被曝

前にも述べたように、体内被曝については、これは医学の問題なので触れない。また、ここまで「被害の説明」は、どちらかというと、

生き残る可能性がほとんど無い地域と、ほぼ生き残ることができる地域
との、中間の地域

を想定して来たのだが、体内被曝の問題は、生き残った人たちの長期的健康上の問題という面が強くなる。こうなると、評価の視点が異なり混乱の元となる。これも体内被曝には触れない理由のひとつしておこう。

remark. 仮に、政府が

「核爆発のキノコ雲が見えても、見つめていてはいけません。遮蔽物の影に退避しましょう」

と広報したならば、それは、爆心点から離れている人たちに対して、無駄に放射線を浴びて長期的健康を損なわないように、注意しているのだろう。「生き残れるかどうか」という地域では、火球からの熱線は凄まじく、見つめることなど不可能なのだ。

第9章 参考文献と言い訳

日本語で書かれた本のなかでは，McNaught：「核兵器」が簡潔で，かつ，計算にまで踏み込んでいるという点で，最良の参考文献だと思う。そもそも，この本を手に取る機会がなかったならば，この資料を作ることもなかったはずだ。しかし，残念なことに，現在書店で目にすることはない。また，「核兵器を使う側」の視点が露骨（なので日本で出版できたこと自体が驚き）。

INW: The Effects of Nuclear Weapons は分厚い洋書。おそらく，一般に手に入る資料としては最も詳細な資料なのだと思う。しかし，分厚い。

この本は，高度の予備知識を要求する「専門書」ではなく「一般的解説」に分類されるのだろうが，それでも，普通の感性から言えば「難しすぎる」。

この「難しすぎる」というギャップは，扱っているテーマが広く記述が詳細である故に分厚いという明らかな要因の他にも，

1. 「10 の個数を数える」という感性の欠如と，また，それをやってみる気力が不足しているという，テキストを読む側の問題
2. 背景を含めてある程度は理解していないとまずい事柄と，公式として認めて使えばなんとかなる事柄を，あまり区別せずに述べる，というテキストを書く側の問題

に求められると思う。それを解消するために，テーマを絞った上で

1. まず，「10 の個数を数える」練習から始める
2. 「ある程度の理解」が必要なことは，正確さを犠牲にしてでも説明を試み，「公式として認めてしまう」場合には，そのように宣言する

という方針で，テキストを作ってみた。

10 の個数を数えるという視点からのスケールの把握には，

細かいことは気にしない

という割り切りが必要なのだが、これは学校教育には最も向かないテーマなのだろう。残念なことに、この「細かいこと」は精度の問題だけでなく、単位の表示の仕方から、暗黙の仮定まで、各種さまざまなのだ。そういった「細かいこと」を気にせずに計算してみれば楽しいのだが、そのような楽しいはずのことは、テストには向かない。それ以前に、核爆発の計算が楽しいようでは、どうかしている。

remark. したがって、核爆発の代わりに隕石（や小惑星）に登場してもらった。小惑星による全海洋蒸発の計算が楽しいというのも、どうかしていると言えどどうかしているのだが、まあ、現実味がない話なので、良いことにしよう。

以上、まとめると、言い訳である。言い訳は許されないと感じるならば、ぜひ，“The Effects of Nuclear Weapons” を読んで欲しい。

McNaught: 「核兵器」 L.W. マクノート, 地人書館 おそらく絶版

ENW: The Effects of Nuclear Weapons, Glasstone,Dolan, ISBN: 978-1-60322-016-3

第10章 Appendix : 核分裂 1.

核爆発という現象の理解のためには不要なのだが、核分裂の物理についてもう少し。

10.1 用語の説明

10.1.1 原子核と電子

物質は原子により構成され、原子は

1. 電子
2. 陽子
3. 中性子

で作られる（これ以上は立ち入らない）。そして

1. 電子は負の電荷をもち、
2. 陽子は、電子の電荷と等しい大きさの、正の電荷をもつ。
3. 中性子は電荷を持たない。

陽子と中性子は原子核を構成し、電子は

原子核の周囲に漂っている。

しかし、これは不思議なのである。正の電荷と負の電荷は、クーロン力により引きつけられるので、電子は原子核のなかに引き入れられてしまうはずだ。なぜそうならないのかは、量子力学（シュレディンガーの方程式）で解決されるのだが、この不思議はそのまま受け入れることにしよう。

原子核は、一般には複数個の陽子（と複数個の中性子）で構成されているのだが、これも不思議である。同じ正の電荷をもつただから、陽子と陽子は反発し合い、温かく原子核のなかに留まっているはずがないのである。この不思議は、核力の理論で解決される。核分裂・核融合は、原子核周辺の電子の振る舞いではなく、原子核の変化に関わるので、こちらの不思議は重要なのだが、これもそのまま受け入れることにしよう。

10.1.2 陽子と中性子

このまま受け入れるのだが、次の点は重要である：

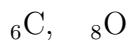
1. 反発し合う陽子を原子核に留めておく力、核力、には中性子の存在が絡んでいる。
2. したがって、原子核を構成する陽子の個数に従って、必要な中性子の個数も変わってくる。
3. 陽子と中性子は永劫不变な存在ではなく、中性子（電気的に中性）が陽子（正の電荷）と電子（負の電荷）に変わることもある。これは、残留放射性物質の放射線のメカニズムにも絡む（ β 崩壊）。

10.1.3 原子核

原子核の種類を核種という。原子核に含まれる陽子の個数を原子番号といい、通常 Z で表す。

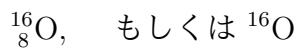
また、原子核に含まれる陽子の個数と中性子の個数の合計を質量数といい、通常 A で表す。

周期表に現れる元素は、原子番号 Z により決定される。例えば、炭素 C の原子番号は 6、酸素 O の原子番号は 8 であり、原子番号も明記して表すときは、



のように表す（C, O の文字だけで原子番号はわかるので、原子番号は明記しないことが多い）。

原子核の種類、核種は、原子番号 Z と質量数 A の両方で決まる。例えば、質量数 16 の酸素 O は



と表される。

ある元素（の核種）と、同じ個数の陽子をもち（したがって同じ元素であり）、異なる個数の中性子をもつ核種を同位元素という。

陽子の個数に対して、核力により原子核を維持しやすい中性子の個数が決まっている。そのため、それ以外の個数の中性子をもつ原子核は、ある程度の時間で（極端に短い場合も、また極端に長い場合もあるにせよ、ある程度の時間で）もっと安定した原子核に変わってしまう。そのとき放射線をだすことが多い。このような、放射線を放ちながら他の原子核に変わっていく核種を放射性同位元素という。

多くの元素では、安定して存在する核種は一種類しかなく（つまり中性子の個数は陽子の個数から決まり），他は放射性同位元素になる。ただし、複数個の「安定して存在する」核種が存在するケースもある。

10.1.4 ウラン

ウランはその典型であり、原子番号は 92 だが、質量数の異なるウラン

1. ウラン 235, 記号で表すと ^{235}U , もしくは $_{92}^{235}\text{U}$
2. ウラン 238, 記号で表すと ^{238}U , もしくは $_{92}^{238}\text{U}$

が共に「安定して存在する」。

しかし、実は、両者共に、本当に安定して存在しているわけではなく、非常に長い時間をかけて他の核種に変わっていくために（半減期が長いために），安定して存在しているように見えるに過ぎない。

その意味では、ウランはすべて放射性同位元素ということになり、「劣化ウラン（主にウラン ^{238}U ）による被曝」も存在するのだが、非常に長い時間をかけて変化する以上、単位時間に放射する放射線は極端に少ない。ウランという重金属の化学的毒性と放射線被曝のどちらが深刻なのかは、簡単には言えない。

このような、極めて長い時間をかけて変化する放射性同位元素、見方を変えれば安定した元素が存在するため、それが変化していく過程で生じるさまざまな放射性同位元素が存在し、地球上には色々な放射性同位元素が（微量とはいえ）存在することになる。

remark. 例えば人間の身体には、縄文人の時代からすでにカリウムの同位元素⁴⁰Kが微量だが存在し、常に数千ベクレルの内部被曝を受けている。

10.1.5 中性子の割合

比較的原子番号の小さい原子では、陽子の個数と中性子の個数が同じ程度の割合である。原子番号が大きくなると、陽子の個数よりも中性子の個数が多くなっていく傾向がある。例えば、ウラン 235, $^{235}_{92}\text{U}$ では、陽子の個数 92 に対して、中性子の個数は $235 - 92 = 143$ 個であり、かなり多い。

喻えて言うならば、大きな原子核は反発し合う陽子を原子核内に留めておくために「無理をしている」のであり、そのために核力という「接着剤」に関与する中性子の個数が多い、という雰囲気である（無理矢理な喻えだが）。しかし、ウランやプルトニウムの場合では、「無理をしている」という「無理」はギリギリの状態であり、もうひとつ余分の中性子を取り込んでしまうと、ひとつの原子核として留まることができなくなり、2つの破片に分裂してしまう（ことが多い）。

この「中性子の比率が大きい」ということは、ひとつには核分裂の連鎖反応と、もうひとつには核分裂破片が放射能をもつことと、関連している：

1. ウラン（もしくはプルトニウム）の原子核が2つの破片に分裂すると、それぞれの破片は、もはや大きな原子番号の核種ではない。
2. したがって、陽子の個数と同じ程度の個数の中性子を含むときのみ、安定して存在できる。
3. つまり、中性子が余ってしまう。
4. この過剰な中性子は
 - (a) 核分裂とほぼ同時に、いくつかが飛び出して行く。これが連鎖反応を引き起こす。
 - (b) それでも、分裂破片は依然として中性子が過剰で安定しない。この過剰な中性子は、分裂破片のなかで「中性子が陽子と電子に変わる」という変化を引き起こし、電子と、さらに余ったエネルギーをガンマ線として、放射することになる。つまり、分裂破片は放射能をもつ。

10.2 核分裂と連鎖反応

10.2.1 核分裂

原子核が中性子を吸収して、不安定な状態になり、原子数の少ない2つの原子核へと分裂をするプロセスだが、これも、意外に複雑な現象であり、その結果として、「即発ガンマ線」と言うときの「即発」の意味、「熱エネルギーと放射線のエネルギーへの分配比率」等は、まともに記述しようとすると厄介な面を持つ。したがって、用語の多少の曖昧さは許容して話を進めることになるのだが、どのように「複雑」なのかだけかは、見ておくことにしよう。

1. 中性子を吸収してから分裂するまでの時間は瞬時とみなしても構わない。
2. 「なにに分裂するか」はさまざまである。
3. 分裂した先の2つの原子核（分裂破片）は
 - (a) 正の電荷を持つので互いに電気的に反発し逆方向に飛び出し
 - (b) その運動エネルギー以外にも分裂破片は内部に余分なエネルギーを持つ（励起されている）。
4. 一般に、原子数の多い原子核は中性子過剰なため、分裂して原子数の小さい核種になると中性子が余る。この余った中性子が飛び出して核分裂の連鎖を引き起こす。
5. いくつの中性子が飛び出すかは「なにに分裂するか」に依存するが、2つの破片合計で平均2個より少し多い程度。
6. 分裂破片の「運動エネルギー以外の余分なエネルギー」の一部は中性子が飛び出すことにより、残りはガンマ線として放射（即発ガンマ線）されることにより消費され、励起状態は解消される。
7. ここまで的过程も瞬時とみなして良い。
8. しかし、分裂破片は依然として中性子過剰なため不安定な放射性物質（不安定同位元素）であり、様々な半減期で崩壊して、最後は安定な原子核になって落ち着く。

9. 核分裂から始まって安定した原子核に落ち着くまでのプロセスで、膨大なエネルギーが放出される。

つぎに、この「膨大なエネルギー」(約 200 MeV) がどのように配分されるかという割合は

1. 分裂した破片の運動エネルギー 165 MeV
2. 中性子線 5 MeV
3. 即発ガンマ線 7 MeV
4. 核分裂生成物崩壊に伴う放射線（主にベータ線とガンマ線） 13 MeV
5. ニュートリノ（何もしないので無視して良い） 10 MeV

である [ENW, pp 12]。エネルギーの単位 MeV を使っているが、無視して配分の比率をみるだけで良い。

しかし、これはあくまでも「1回の核分裂」におけるエネルギー配分であり、つまり連鎖反応全体でのエネルギー配分ではなく、さらに、即発ガンマ線までのエネルギーのほとんどは核兵器の筐体や燃焼済みの火薬等の手近な物質に吸収されるので、核爆発の被害を検討するときには、これらの比率は直接的には意味を持たない。

おおざっぱな言い方ではあるが、上の比率で分配されたエネルギーの即発ガンマ線までの多くはデブリに吸収され、超高熱のデブリは（純放射線兵器として）エックス線を放ち、それを周囲の空気が吸収して火球を発生させ、火球が熱線とショック・ウェーブを発生させる、ということになる。ニュートリノは何もせず、核分裂生成物の多くは火球の中に留まり、初期放射線と残留放射線としての被害を与える。

ただし、核分裂生成物質のなかでも半減期が極端に短い放射性物質は、ほとんど即座に崩壊して、そこから発生する放射線のエネルギーのほとんどは周囲のデブリに吸収され、火球の熱エネルギーに変わる。したがって、火球のエネルギー、放射性物質の持つエネルギー、(漏れ出した) 放射線のエネルギーの三者の比率を決めようとしても、「どの時点での」という点に強く依存するので、整合性がとれない記述がでてくる原因になる。おそらく、整合性を保つためにはかなりの人為的基準を設けておく必要があるのだろう。

初期放射線と残留放射線を分けるために「1分以内」という人為的基準を使ったが、もっとスケールの短い時間のできごとについても、人為的基準が使われているはずである。

10.2.2 連鎖反応

次に、

1. 核分裂を継続させることの難易度
2. およびその結果として決まる核爆弾制作の難易度
3. 爆発規模の限界

を見るために、連鎖反応の詳細を調べる。詳細といつても、原子力工学の教科書が原子炉内での連鎖反応について記述するレベルに比べれば、遥かに簡単である。

継続のための条件

核分裂により数個の中性子が発生し、それが次の核分裂を引き起こす。しかし、発生した中性子のすべてが次の核分裂につながるわけではなく、特に、核分裂物質の濃度が低かったり半径が小さいときには、核分裂物質の固まりの外へ逃げ出してしまう割合が多くなり、連鎖反応は続かない。

したがって、「有効に使われる」中性子の平均が 1 以上であることが、連鎖反応が続くための条件となる。

この「臨界条件」を僅かに超えた穏やかな連鎖反応を利用するのが原子炉であり、一方、兵器の場合は、出来るだけ大きな倍率で連鎖反応が続くことが必要になる。

臨界を中途半端に超えた反応は、原子炉の場合は「暴走」であり、その「爆発力?」により破滅的な事故となる。

一方、兵器の場合は、その程度の「爆発力」では核兵器とは言えない。確かに兵器を吹き飛ばしてしまうという意味では爆発力なのだが、そのような緩慢な反応では、ほとんどの核分裂物質は未反応の状態で吹き飛ばされてしまうことになるので、核爆発としては問題にならない規模の爆発、言うならば、「不発」ということになる。

さらに、核兵器としての核分裂の場合には、「吹き飛ばす」ということの意味がもっと厳しく、普通に「吹き飛ばされた」とみなされるような派手な「吹き飛ばす」でなくとも、核分裂物質の半径が少し大きくなるだけで、臨界を「超えている程度」は下がってしまう。

したがって、連鎖の増加率が大きい濃度と形状から反応をスタートさせて、それを保っている間に反応を完了してしまわないと、核爆発と言うにふさわしい反応は実現できないということになる。

半径が大きくなるだけで連鎖の増加率が下がり（つまり反応の規模が例えれば 10 倍になるまでの回数が増えてしまい），もたもたしている間にますます半径は大きくなり，という悪循環が障害となるのである。そうは言っても，核爆発のエネルギーに抗して形状を保つにも限界があるので，純粹な核分裂だけでは大出力の核兵器を実現することは困難である。

半径・密度と連鎖反応

連鎖反応を拡大していくことができるか，それとも，いったん始まった連鎖反応が減衰して終わってしまうかは，核分裂物質（ウラン 235, もしくはプルトニウム）の量と密度と形状に依存する。

まず，核分裂物質の密度を一定として，「無駄になる中性子の割合」，つまり「連鎖反応の過程から漏れ出てしまう中性子」の割合が，球体の核分裂物質の半径 r にどのように依存するかを概算してみる。

乱暴な仮定だが，この割合が球体から外に飛び出していく割合だと仮定して，それが球体の表面積に比例すると仮定する。表面積は r^2 に比例し，ある時点での中性子の個数は球体の体積（こちらは r^3 に比例）で決まるので，

$$r^2 \div r^3 = \frac{1}{r}$$

に比例して，無駄が増えるという結論を得る。

密度は一定としているので，体積は核分裂物質の質量に比例する。得られた結論は，

連鎖反応が拡大して行くかどうかは，核分裂物質の質量で決まり，（密度が一定ならば）連鎖反応が拡大していく（臨界を超える）ことを保証する最低質量が決まる（臨界質量）

ということである。

次に，密度 ρ の影響を概算する。密度は「球体の表面近くでの核分裂で発生した中性子が，つぎの核分裂を引き起こす前に外に飛び出してしまう確率」として「無駄になる割合」に影響する。

密度が高ければ，球体の表面近くで発生した中性子であっても，表面に辿り着いて外に抜け出す前に吸収され，次の核分裂を引き起こす割合が高い。逆に密度が低ければ，表面からかなり離れた場所からでも，吸収されずに逃げ出せる割合は高く

なる。それでは、「大工さんの人数が2倍になれば、家が完成するまでの日数は半分になる」という程度の概算だが、

外に飛び出していく中性子の個数は、表面積 $\times \frac{1}{\rho}$ に比例する

と仮定してみよう。この場合、無駄になる割合は、

$$\frac{\text{表面積} \times \frac{1}{\rho}}{\text{体積}}$$

であり、これは

$$\frac{1}{r\rho}$$

に比例する。

ここで、今度は核分裂物質の量を一定にして、それを圧縮して半径を小さくしていくケースを考えると、密度 ρ は体積に逆比例し、したがって r^3 に逆比例することになる。よって、無駄になる割合は

$$\frac{1}{r \frac{1}{r^3}} = r^2 \quad \text{に比例}$$

ということになり、圧縮されて r が小さくなるに従って無駄になる割合も低下する。

これはあまりにも乱暴な概算なのだが、

核分裂物質を圧縮すると臨界を超える

という定性的結果を納得するためには、十分であろう。

これが爆縮による核分裂というものの原理である（爆縮による圧縮は、小さな多数の破片を短時間で一つにする擬似的圧縮が主体であり、1つの球体になってからの圧縮がどの程度の効果なのかは知らない）。もうひとつ言えることは、

連鎖反応の途中の、すでに、そこまでの核分裂により超高温になっている時点からは、その超高温による膨張により、密度は低下し、連鎖反応の効率は悪くなる

ということである。つまり、

連鎖反応を継続させることは、核爆発に対抗しての時間との争いになる

ということである。

タイムスケール

それでは、大型化はともかく

兵器として威力を発揮する規模の核爆発は、そもそも可能なのか

ということが問題を考えてみよう（もちろん、結果は知っているのだが）。

これを〔おおざっぱにせよ〕解析するためには、連鎖反応のタイムスケールとの比較が不可欠である。

核分裂によって生じた中性子が次の核分裂を引き起こすまでの平均時間、つまり連鎖反応の“1 generation”は、

約 10 nsec (10 ナノセカンド)

である ([ENW, pp 17]). なお、1 ナノセカンド は、10 億分の 1 秒: $1 \text{ nsec} = 10^{-9} \text{ sec}$

次に問題になるのは、核爆発を完結させるのに何回の generations が必要なのか、という評価である。相当雑な評価ではあるが、連鎖反応の増加率、つまり、1 generation で核分裂を起こす原子核の個数が何倍になるかという率を、計算しやすいように 2 として、必要な generation の数を評価してみると、以下のようになる。

1. 1 個の原子核が核分裂をしてから 1 kcal のエネルギーが解放されるまでに、46 generations が必要
2. 1 kt(TNT) という原爆級のエネルギーが解放されるまでには、さらに 30 generations が必要
3. そこから 4 generations で広島・長崎級の爆発規模になる。

「10 の個数を数える計算」の練習として、計算過程を見てみよう：

1. 使用する数値は

- (a) 1 個の原子核（ウラン 235、もしくは プルトニウム 239）の核分裂で解放されるエネルギーを 200 MeV とする。
- (b) 1 MeV は、

$$1 \text{ MeV} = 1 \times 10^6 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

(c) $1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$

(d) $1 \text{ kt(TNT)} = 10^9 \text{ kcal}$

2. 1 個の原子核の核分裂で解放されるエネルギー 200 MeV は

(a) J に換算すると $200 \times (1.602 \times 10^{-13}) = 3.204 \times 10^{-11} \text{ J}$

(b) kcal に換算すると, $(3.204 \times 10^{-11}) \div (4.184 \times 10^3) = 7.658 \times 10^{-15} \text{ kcal}$

3. この数値を

$$1 \div (7.658 \times 10^{-15}) = 1.306 \times 10^{14} \text{ 倍}$$

すると 1 kcal になる。

4. n generations の核分裂が生じた時点で, その時点までの核分裂の回数は

$$1 + 2 + 2^2 + 2^3 + \cdots + 2^n = 2^{n+1} - 1, \quad \text{約 } 2^{n+1} \text{ 回}$$

5. $2^{10} \div 10^3$ という近似計算を使って計算すると

$$2^{40} = (2^{10})^4 \div (10^3)^4 = 10^{12}$$

$$2^{47} = 2^7 \times 2^{40} \div 128 \times 10^{12} = 1.28 \times 10^{14} < 1.306 \times 10^{14}$$

$$2^{48} \div 2.56 \times 10^{14} > 1.306 \times 10^{14}$$

なので, n は 46 と 47 の間, という結論が得られる。ただし, $2^{10} = 1024$ を 10^3 と見なす近似はあまり制度は良くなく, 関数電卓で計算すると

$$2^{47} = 1.4073 \times 10^{14}$$

であり, $n + 1 = 47$ の時点で目標の倍率を超えている。

6. 以上により, 46 generations で 1 kcal を越えるという結論が得られる。

7. 次に, 1 kt(TNT) になるまでの回数だが, これは

(a) $1 \text{ kt(TNT)} = 10^9 \text{ kcal}$ なので,

(b) $2^{47+m} \div 2^{47} = 2^m > 10^9$ となる回数 m を求めれば良い。

$2^{10} \div 10^3$ であることにより, m を 30 回とした。

8. この時点から 4 generation の追加で, $2^4 = 16$ 倍の核出力となる。広島・長崎の原子爆弾の核出力は, この程度の値として計算している。

この計算は, 途中で概算をしているという以上に, 実際の核爆発に対しては粗い概算となっているはずだ :

1. 反応の過程で, 1 generation での「増殖率」(ここでは 2 としている) が変わらない, として計算しているが, この値は変化する。
2. ここで計算は「核分裂が各 generation で同時に起こる」とした計算だが, これは無理があるので, 微分方程式を解いて計算すべきである。

したがって,

16 kt(TNT) の核爆発では, 約 $46 + 30 + 4 = 80$ generations の核分裂が必要であり, 核爆発に掛かる時間は約 800 nsec = 0.8 μ sec

という結論も, 数値として信頼できるものではない。それでも, 実際のデータと「桁が違う」という程の相違はないと思う。

概算としての数値以上に興味深いことは,

1. 600 nsec の間の反応 (60 generations の反応) では, 1 kcal の熱が発生するだけであり, 反応途中の「核燃料」に対する物理的影響は無視できる。
2. 760 nsec から 800 nsec までの 40 nsec の間の核分裂は, 既に 1 kt(TNT) の核爆発が発生している弾頭のなかで維持しなければならない。
3. その途中の 300 nsec の間の連鎖反応も, 後半はかなりの「爆発」のなかで連鎖反応を維持する必要がある。

このような事情で, 連鎖反応の継続という課題を抱える核爆弾では, いくら「核燃料」を多くしても 100 kt(TNT) を越えるような核出力を得ることが難しくなるのであろう。

なお, 1 kt(TNT) から 16 kt(TNT) までの最後の 4 generations については, 信頼性はかなり低い。おそらく, この辺りでは連鎖反応の維持は困難になっていて, 1 generation での「増殖率」2 という数値は, もっと小さな値に変わっているのではないだろうか。

もうひとつ興味深い点は,

核兵器というものは、核分裂の連鎖という物理学的な原理のみから存在が保証されるわけではない

ということである。1 generation が短時間であるという、原理と言うのは相応しくない事実が必要なのであり、極端な話、これが $1 \mu\text{sec}$ であったならば、 1 kt(TNT) の核爆発の「超高温」の中で連鎖反応を維持できるとは思えない。

remark. 同じような計算をしてみると、ひとつの結論は「原子炉の制御など不可能であり、連鎖反応が生じないか、ほぼ瞬時に暴走するかどちらかになるだろう」という結果である（臨界をごく僅かに超えた 1.001 という増殖率でも $(1.001)^{700} = 2.01$ であり、 $7 \mu\text{sec}$ で 2 倍に増殖してしまう）。原子炉というものが実現でき、また、そこで核兵器の「核燃料」プルトニウムを作ることができたという歴史的事実は、「遅発中性子」という「連鎖反応をゆっくりにする」現象が存在したためであり、この歴史的事実も、核分裂という物理学的原理（遅発中性子まで原理と言えばそうなのだが）のみで存在するものではない。

remark. もうひとつ、核分裂を起こすためには、まず、ウラン 235 やプルトニウム 239 の原子核に中性子が吸収されなければならない。この吸収は、「中性子が遅い速さで原子核に近づく」ときにのみ、生じる。したがって、核分裂により飛び出した中性子は、衝突を繰り返すなど、なんらかの作用を受けて減速している必要がある。したがって、連鎖反応の制御では、減速材というものが重要になる。

remark. 一方、ウラン 238 という「核燃料として不適なウラン」は、高速中性子が原子核に「衝突する」ことにより、核分裂を起こす。核融合は、連鎖反応ではなく、核分裂を利用して「超高温」を実現すれば、一気に反応をする。また、核融合は高速の中性子を大量生産するので、

1. 核分裂により「超高温」を作り出し
2. それにより核融合が引き起こされ（ここまでが「水爆」）
3. 「水爆」の周囲をウラン 238 で包んでおくことにより、連鎖反応の限界に束縛されずに核分裂を利用することが可能になる。

しかし、核分裂は核分裂破片という放射性物質を作り出すので、これは最も「汚い」核兵器となる。

remark. 最後に、有名な $E = mc^2$ だが、これは核爆発固有の根拠ではない。 $E = mc^2$ は、ランプの灯りであろうと、火力発電であろうと、物質からエネルギーを取

り出す過程すべての根拠であり、核反応固有のものではない。通常の化学反応では質量の差があまりにも小さく測定不可能であることに対して、核分裂ではウラン 235 の原子核の質量と、それを構成する陽子・中性子の合計質量との差（もしくは、分裂破片との質量差）が測定できるレベルであるために、 $E = mc^2$ が「計算して利用できるもの」となっているに過ぎない。ただし、当時の科学者が、核分裂により解放されるエネルギーに気づき、それを兵器として利用するというアイデアに至った原因としては、確かに、 $E = mc^2$ があったのだろう。

10.2.3 結論：核兵器を作るのは難しい

いきなり結論になってしまふが、

核兵器を作るのは、とても難しい。

当たり前のことだが、核爆発とよぶに値するレベルの核爆発を発生させるための核分裂物質を手に入れることが、極めて難しい。

ウラン 235 について言うならば、原子炉の核燃料のレベル（ウラン 235 のウラン 238 に対しての割合がそれほど高くないレベル）では、核兵器は作れない（ウラン 238 の割合が大きい球体では、ウラン 235 の密度は低くなってしまうため）。原子炉の核燃料レベルから更に純度を高めるための分離作業は、小規模の組織では無理である。

プルトニウムとなると話は別で、例えば使用済み核燃料からプルトニウムを分離する作業は、化学的性質の違いを利用するはずなので、235 : 238 という僅かの質量比に頼って物理的に分離しようとする作業よりは、容易なはずである。ただし、作業の途中で致死量の被曝をすることになりそうだ。

一方、「兵器級プルトニウム」という言葉は、「自発核分裂」を起こしやすいプルトニウム同位元素の比率が少ない、ということのようだ。この不純物の分離は難しそうだが、本当のところ、「自発核分裂」が爆縮の途中で連鎖反応のフライングを起こしてしまうことが、どの程度連鎖反応の継続を難しくするかは、知らない。

それでは、兵器として使える十分な量の核分裂物質が手に入ったとしよう。その場合でも、「連鎖反応が継続する」という条件を満たす装置の制作は難しい。「大学生が図書館で勉強すれば作れる」などという簡単なものではない。爆縮という精密作業はともかく、最も単純な

臨界量に満たない半球形のウラン 235 の固まり 2つを、火薬の爆発でぶつけて球体を作る

という原理で作るにしても、雑な作業では半球形の 2つの固まりが斜めになってぶつかることになりそうだ（その場合、高い増殖率は得られない）。それではピッタリしたケースを作つてその中でぶつけることにすると、今度は間の空気がクッションになってしまいそうだ。そもそも、頑丈なケースを作ることだけでも、なかなかの作業であろう。それでは、手に持ってひっつけたら？これは、デーモンコアという有名な例を持ち出すまでもなく、本人は放射線被曝で確実に死ぬことになり、また、周囲の建物を壊す程度の核爆発なら引き起こすことができるかも知れない。しかし、都市を破壊し尽くすような規模のものにはならない。

以上、結論は

核兵器という精密兵器を作ることは難しく、また、核兵器とよぶに相応しい連鎖反応の継続を正しく評価することも、大変な作業である。

それでは、もっと高度の解析が必要な「核分裂の連鎖反応を継続させることは難しい」についてはどうだろう；

核兵器は、すでに発生している核爆発の火球付近を通り抜けてから、もしくは火球の中を通り抜けてから、周囲に飛び交っている中性子線のなかで、精密兵器としての能力を維持できるか

残念ながら、このレベルとなると、ここまでで参考にした書籍程度のデータでは、手が出ない。そもそも、公開されている情報だけで結論が出せるかも不明である。

参考文献

McNaught: 「核兵器」 L.W. マクノート, 地人書館 おそらく絶版

ENW: The Effects of Nuclear Weapons, Glasstone,Dolan, ISBN: 978-1-60322-016-3

第11章 Appendix 2: もう少し物理を

11.1 核分裂

まず、1つの原子核の核分裂について、2つのアプローチで記述する。

- 最初のアプローチでは、「10の個数を数える練習」として、クーロン力のみで核分裂のエネルギーを評価してみる。
- 次に、そのような単純化した核分裂ではなく、核分裂の過程を、やや詳細に記述する。

最初のアプローチは、「10の個数を数える練習」であり、つぎの詳細な過程の記述も、核爆発という現象を理解するためには、必須ではない。ただ、エネルギーの分配比率等を持ち出すときにつきまとう曖昧さが生じる理由は、「やや詳細な記述」を振り返ると納得できると思う。しかし、それだけのことであり、無視しても困らない。

もうひとつ注意を：

核分裂については、その理解が兵器だけでなく原子炉の制御でも必要になるので、専門書がいくらでも手に入る。

放射線の遮蔽と同様に、興味があればそのような専門書に当たってみれば、正確な理解が得られると思う。ただし、どちらの専門書も、難しい。

remark. 前に、核爆弾について説明されている資料よりも、原子炉工学についての専門書は遙かに難しいと言ったような気がする。確かに、原子炉は穏やかな臨界というギリギリの状況に関わるので、「とにかく大幅に臨界を超えるべし」という核爆発よりも、精密な理解が必要ということは納得できる。しかし、核爆発は核爆発で、強力な核爆発へと向かう爆発の中で連鎖反応を継続させなければならないの

で、それはそれで「ギリギリの状況」に関わっているはずだ。おそらく、難易度の違いは、

原子炉工学の教科書は、それを取り扱う（かもしれない）技術者を養成するために書かれているが、核爆発についての資料は、専門家養成とは無縁（であり、無縁であるべき）

ということだと思う。要するに、核爆発を実際に発生させるための知識は、

図書館で勉強することが可能

であるべきではないのだろう。

remark. しかし、あなたたちは知る必要はないのだから、と言われると知りたくないだ。と言うわけで、もう少し核爆発の物理に立ち入ることにしよう。

11.1.1 核分裂：10 の個数を数える

問題点

核分裂により解放されるエネルギーの源は、

正の電荷と正の電荷、もしくは、負の電荷と負の電荷は、反発する
というクーロン力である。

原子核は、

1. 正の電荷を持つ陽子と
2. 電荷を持たない中性子

で構成され、陽子の個数に比例した正の電荷を持つ。

原子核の周囲には、原子核の正の電荷を打ち消す個数の電子が存在する。1 個の電子と 1 個の陽子は、符号が逆で同じ量の電荷を持つので、原子核内の陽子の個数と、原子核の周囲に存在し原子を構成する電子の個数は等しい。

したがって、原子としての電荷は（つまり原子核と周囲の電子を、遠くから 1 個の原子として見ている場合の電荷は）零であり、原子は「電気的に中性」である。

原子の「周囲」にある電子の状態を電子の「軌道」と捉えて、その軌道の変化を調べたり、また、原子の周囲にあった電子が飛び出してしまい、多数の原子核の間

を多数の電子が漂っている状態に変化したり、 いずれにせよ電子の振る舞いから決まる現象が、 化学の領域となる（プラズマ物理は……無視しよう）。ともかく、 そこでは原子核は変化しない。

一方、 核分裂や核融合は、 原子核の状態の変化に関わる。

ここでは、 10 の個数を数える計算練習として、 核分裂という現象を、

1. 原子核が 2 つの部分に分かれると
2. それぞれの破片は正の電荷を持ち
3. 同じ電荷なので反発し、 その反発力により互いに逆の方向に加速され
4. その運動エネルギーが核分裂により解放されるエネルギーとなる

というストーリーで説明してみる。

ここまででも「10 の個数を数える計算」を練習してきたのだが、 それらは、 主に「途方もなく大きな数を評価する」という目的のためであった。同様に「途方もなく小さな数を評価する」という練習をすることもできる。しかし、「10 の個数を数える計算」が最も威力を発揮するケースは、

途方もなく大きな数と、 途方もなく小さな数の積を評価する

というケースである。これは、「10 の個数」としては単に引き算をしているだけなのだが、「東京ドーム何杯分」的な直感では手も足も出ない。そのような（分かったつもりになるための）直感では、 掛け合わせた結果が大きな数になるか小さな数になるかも、 分からないのだ

それでは、 核分裂をクーロン力で説明してみよう。

これに絡んで、 まず、 注目しておくべきポイントは、

1. クーロン力は、 万有引力と似た式で計算されるが、 万有引力とは比べものにならないほど大きいということ
2. それならば、 原子核周辺の電子は、 原子核にクーロン力で引きつけられ原子核内に取り込まれしまいそうなものだが、 なぜそうならないのか

3. なぜ、原子核内でクーロン力で反発し合っているはずの複数の陽子が、温和しく原子核のなかに留まっているのか

など。

クーロン力が大きいということについては、ただそれだけのこと。しかし、2. と 3. は変な話だ。結論を言うと、2. は、これを解決するために量子力学が誕生したようなものであり、量子力学により解決されたと言えば、解決されたのであろう。2. は、電子に関わる問題なので、核分裂では登場しない。

remark. 化学は、原子核の周囲の電子に関わる。それでは、その電子が原子核内に取り込まれてしまうような化学変化が存在すると仮定してみる。その場合、発生するエネルギーは、おそらく「巨大なエネルギーを発生させる化学反応」となるだろう。ただし、電子が原子核にまで「落下」することはないので、化学反応と核反応では「すごさが違う」と言うことになる。

remark. しかし、電子が原子核まで「落下する」というようなケースの危うさは、すでにニュートンの万有引力の法則にも隠されているのであり、1 g の質点と 1 g の質点が衝突した瞬間に解放される位置エネルギーは、無限大である（のだが、質点の大きさは零なので、衝突はしないと考える）。

3. は、もっと難しい問題であり、要するに、反発し合う陽子たちを原子核内に留めておくことのできる（近距離では）もっと強力な「核力」というものについての理論が必要になる。これは理論としては難しいとしても、イメージとしては、反発し合う陽子たち（と中性子たち）が「接着剤」でひとつの固まりとしてひっつけられているとイメージすれば、なんとかなりそうである。難しい問題は無視して、

簡単に計算できるクーロン力だけで、核分裂のエネルギーを評価してみる

ということを試みる。

まず最初に、

クーロン力は途方もなく強い

ということを計算して確かめてみよう。

クーロンの法則

電荷の単位は、クーロン (coulomb) であり、単位を表す記号としては C を用いる。1 秒間に 1 C の電荷が流れる電流が 1 アンペア となる。

1 アンペアの電気製品は、身のまわりにたくさんある。その意味では、1 C は「身近な大きさ」である。

重力質量と異なり電荷には正負があるということを除けば、クーロンの法則は「万有引力の法則」と似ていて、2つの荷電粒子の間に働く力（クーロン力）は、両者の電荷の積に比例し、距離の2乗に逆比例する：

$$F = \kappa \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

ここまででは、重力の場合と似ているのだが、決定的違いは、係数 κ の値

$$\kappa = 8.9876 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$$

の大きさであり、その結果、

- 人間的スケールでは物体相互の引力は無視できるくらい小さいのだが、
- クーロン力はやたらに大きい

ということになる。とは言っても、一向に実感は得られないので、計算してみよう。

計算例 30. 相互の距離が 1 m にあり、両者共に 1 C の電荷をもつ2つの物体（質点とみなす）の間に働く力 F は

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{1 \cdot 1}{1^2} = 9 \times 10^9 \text{ N}$$

である。

まだ、感覚的な理解からは遠いので、もう少し考察を続けよう。

まず、この例での 9 は 8.9876 の近似値であり、好みによっては、さらに粗い近似値を採用して 8.9876 を 10 で近似し、

$$F = 10^{10} \text{ N}$$

としても良いのだが、係数があった方が数値らしい見かけなので、9 を採用しておこう。これは、良いのだが、「感覚的理解」から遠いのは「ニュートン」という単位である。

力の単位としてのニュートン (N) は

1 kg の質量の物体に 1 m s^{-2} の加速度を与える力

と定義され、これは物理学で標準的に用いられる力の単位なのだが、多少、実感しづらい。感覚的には

1 kg の物体を手のひらに載せたときに手のひらが受ける力が、約 10 N,
もしくは、少し正確にして 9.8 N

と考えても良い。これは質量ではなく力なので、この力を 1 kgf と表すことになると

$$1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N}$$

ということになる。9.8 は 10 に近いので

ニュートン N で表されている力を kgf に変換するためには、10 の個数を 1 個減らせば良い

としても良い。

つまり、約

$$9 \times 10^8 \text{ kg} = 9 \times 10^5 \text{ tonne}$$

の力（約百万トン）で反発する、ということである。

remark. クーロン力とは、言い方を変えると静電気の力である。静電気と言えば、下敷きを擦って髪の毛を引っ張る、とても弱い力という印象だと思う。実はものすごく強いクーロン力が弱々しいものに見える理由は、

クーロン力があまりにも強いために、正電荷と負電荷のアンバランスが生じると、あっという間にバランスしてしまう

ということ。つまり、下敷きに生じた静電気は、アンバランスがごくごく僅かに残っていることによる力。

ポテンシャルエネルギー

力という概念は、とくにそれを「重さ」と関連付けてイメージした力という概念は、日常の感覚に良くマッチして捉えやすい。しかし、物理学では「力」よりも運動量の方が扱いやすく、また、クーロン力そのものよりも、クーロン力から決まるポテンシャルエネルギーの方が扱いやすい。ポテンシャルエネルギーを考える場合には、まず、1 つの電荷を固定し、

その電荷が静電場という場 (field) をつくり、そこに別の電荷をおくと場との作用でクーロン力が発生する

と考え、

最初におかれた q クーロン (記号は C), ただし $q > 0$, の電荷を持つ粒子を固定する。その粒子から r m 離れた位置に、静止した状態で置かれた 1 C の電荷を持つ粒子が、クーロン力による反発力を受けながら、もはやクーロン力を無視できるほどの遠方まで遠ざかって行ったときに獲得した運動エネルギー

を考え、その位置でのクーロンポテンシャルという。クーロンポテンシャル V の値を与える式は、クーロン力の式から計算して求めることが可能であり、

$$V = \kappa \frac{q_1}{r}$$

となる。この式を導く過程が気になるのなら、この式そのものが最初から与えられているとして、クーロン力については考えないことにしても、これから先、特に困ることはない。

エネルギー保存則

エネルギー保存則により（と言うより、上のやり方で導入した場合には同語反復なのだが）、位置を固定された正電荷の作る静電場に静止した状態でおかれた 1 C の荷電粒子が、反発力によって獲得する運動エネルギーは

$$\kappa \frac{q_1}{r}$$

で与えられる。

計算例 31. 互いに 1 m の距離だけ離れた 1 C の電荷を持つ 2 つの静止した粒子が、反発力により獲得する運動エネルギーの合計を求める。

まず、どちらかの荷電粒子についての、もうひとつの荷電粒子のポテンシャルエネルギーを考えると、

$$\kappa \frac{1}{1} = 8.98 \times 10^9 \text{ J}$$

である。ここではどちらの粒子の位置も固定されていないので両方の粒子が反発力により互いに遠ざかって行くことになるのだが、エネルギー保存則により、最初の

状態でのボタンシャルエネルギーと（2つの粒子の）運動エネルギーの合計は、ボテンシャルエネルギーが（ほとんど）零になる遠距離まで遠ざかったときの状態での（2つの粒子の）運動エネルギーと等しいはずであり

$$8.899 \times 10^9 + 0 = 0 + \text{2つの粒子の運動エネルギーの和}$$

という等式が成り立つはずであり、2つの粒子の獲得した運動エネルギーの合計は

$$8.899 \times 10^9 \text{ J}$$

となる。

計算例 32. 上の計算例で、2つの荷電粒子は共に 1 kg の質量を持つとする。このとき、それぞれの粒子の（遠ざかった後での）速度を求めるとき、

- 2つの荷電粒子の質量は等しいので、エネルギーも等分配されると考えて良く、
- $m = 1 \text{ kg}$ として運動エネルギーは

$$\frac{1}{2}mv^2$$

で与えられるので、

$$(8.899 \div 2) \times 10^9 = 44.495 \times 10^8 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot v^2$$

であり、

$$9.428 \times 10^4 \text{ m/s}$$

と求められる。つまり秒速 94.28 km であり、とんでもない速さである。

11.1.2 電子ボルト

ジュールへの換算

原子核を構成する核子（陽子・中性子）と電子は、それぞれ

- 陽子 (proton) は正の電荷, $1e$
- 中性子 (neutron) は電荷を持たない, $0e$

- 電子 (electron) は負の電荷, $-1e$

を持つ。ここで, e は素電荷 (電気素量) とよばれ, 値は

$$e = 1.6021766208 \times 10^{-19} \text{ C}$$

であり, この電子が 1 V の電位差を移動して獲得するエネルギーが電子ボルト 1 eV なので,

$$1 \text{ eV} = 1.6021766208 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ということになる。この値の換算を 1 eV の定義と理解しても良い。ただし, 大事なのは 1.6021766208 という数値ではなく 10^{-19} という 10 の個数 -19 である。

remark. もちろん, ここで用いた記号 e は, 数学での「自然対数の底」を表す記号 $e = 2.718281\cdots$ とは別のものである。どちらの意味なのかは文脈から明らかであり, 困ることはないのだが, 國際規格などというものを作ろうとすると, 「数学での e は e を使え」などと言い始めるので, 迷惑なことである。

2つに分裂した原子核

ウランの原子番号は 98 であり, 正電荷を持つ 98 個の陽子と負電荷を持つ 98 個の電子が電荷を零に保つ。電子は原子核の外にあり, 原子核には陽子の他に中性子が存在するが, これは電荷を持たない。それでは, ウランの原子核が 2 つに分裂して, 電気的反発力で飛び出して行くときの運動エネルギーを求めてみよう。いくつかの仮定をする。

- 原子核の外にある電子は無視する。
- ちょうど 49 個ずつの陽子を含む 2 つの破片に分裂したとする。
- ウランの原子核の大きさは, 約 $15 \text{ fm} = 15 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.5 \times 10^{-14} \text{ m}$ 程度とされているので, 2 つの破片を, この距離だけ離れている静止した 2 つの粒子とみなす。

以上の前提の元で, 計算をしてみよう。

計算例 33. まず, それぞれの破片の電荷は, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ を電気素量として

$$49 \times e$$

である。次に問題になるのは、分裂した瞬間の 2 つの破片がどのくらい離れているかという評価だが、これは核力との関係で面倒なので、 1.5×10^{-14} と設定してしまう。この破片の 1 つを選び、その作る電場に置かれた電荷 q の粒子のポテンシャルエネルギーは、 $\kappa = 9 \times 10^9$, $r = 1.5 \times 10^{-14}$ として

$$9 \times 10^9 \times \frac{49 \cdot e \cdot q}{1.5 \times 10^{-14}} \quad \text{J}$$

であり、この値が運動エネルギーに変わる。 q の値も $49 \cdot e$ なので

$$9 \times 10^9 \times \frac{49^2 \cdot e^2}{1.5 \times 10^{-14}} \quad \text{J}$$

となるが、エネルギーをジュールでなく電子ボルトで表示することにすると、 e で割ることになるので、

$$9 \times 10^9 \times \frac{49^2 \cdot e}{1.5 \times 10^{-14}} \quad \text{eV}$$

の値を計算すれば良く、

$$9 \times 49^2 \div 1.5 \times 1.6 \times 10^{9+14-19} = 23049 \times 10^4 = 2.3 \times 10^8 \quad \text{eV}$$

という数値が得られ、 $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ を単位として表すと、これは

$$230 \text{ MeV}$$

となる。

ウラン 235 の 1 回の核分裂において放出されるエネルギーは、約 200 MeV とされているので、230 MeV という値は桁が合った評価と言える。

ただし、この例の計算には、色々と問題がある。

まず、最初の、分裂して、しかし静止している状態を 15 fm の距離 ($1 \text{ fm} = 1 \times 10^{-15} \text{ m}$) にあるとしているのだが、これには根拠はなく、「原子核の半径程度のものだとするとこの程度か」というだけの数値である。と言うよりは、実は、結果として出てくる数値が都合の良い値だから採用したのだが。

このようにいい加減な評価なのだが、本当に問題となるのは、

なぜこのような反発力があるにもかかわらず、分裂しないでいることができたのか

ということなのである。結局のところ、

クーロン力による反発を抑え込むなんらかの力（核力）が作用している
ので分裂せずにいられた

と考えることになるのだが、そうだとすると、その力を断ち切るためのエネルギーが必要だったはずだ。

実際、この力を考えないで良いとすれば、すべての原子核は、分裂することによってエネルギーが解放されるはずであり、これは「核融合によるエネルギーの放出」を完全に否定してしまうことになる。したがって、原子核が分裂するとき、もしくは、2つの原子核が融合するときのエネルギーの出入りは、クーロン力という電気的反発力だけではなく、原子核を成り立たせているもうひとつの力、核力についての評価も必要になる。

結論として言えることは、上の計算例でのエネルギー評価は、「計算してみた」というだけのことであり、概算として主張することができる種類のものではない。

それにも関わらず、核分裂の場合については、得られた結果は、実際の数値と桁が違うというほどの違いはなく、それなりの説明にはなっている。

核融合

核融合の場合、状況は全く逆であり、

電気的反発力を乗り越えて2つの原子核が十分近づくと、核力により引き寄せられ「衝突」することになり、その「衝突のエネルギー」が放出される

というメカニズムであり、もう少し物理学らしい描写をすらならば、

- クーロンポテンシャルという長距離まで拡がっているポテンシャル（反発力による正の値をもつ）と、核力のポテンシャルという短距離のポテンシャル（負の値をとる）の合成として作られたポテンシャルは、
- 遠距離では正の値をとり、近くなるにしたがって増加し、「ポテンシャルの壁」（極大値）を境に、井戸に落ち込むように負の値へと減少して行く。
- したがって、その壁を乗り越える運動エネルギーを持った粒子がもうひとつの粒子に近づいて行き壁を越えると、後は2つの天体が重力により引き寄せられ

衝突する場合と同じように、負の値のポテンシャルエネルギーを打ち消すエネルギーが解放され、

- その値は壁を乗り越えるために費やした運動エネルギーの値より大きいということになる。さらに、核融合を引き起こすためには、
 1. 極めて高温にして、
 2. 核融合を起こすべき原子核が高速で飛び回るようにし、
 3. つまり相互に十分な運動エネルギーを持つ状態を作り、
 4. 反発力の働く2つの原子核がポテンシャルの壁を乗り越えて互いに近づく、という「衝突」が頻繁に生じるようにする

という

超高温状態

が必要ということになる。逆に言うならば、十分に高温でないと、互いにある程度近づいた2つの原子核は、核力という短距離力よりもその距離では優勢なクーロン力の反発が働いて、再び遠ざかってしまい、核融合に至らないということだ。

まあ、なんとなくイメージを掴める描写にはなっていると思う。

しかし、それでは

「ポテンシャルの壁」はどの程度のものか

という評価が不明な以上、描写したという以上のものにはならない。また、深刻な難問は、

核力はいうものは、中性子を介して働く

ことであり、要するに「すごく難しい」のである。

よって、結論として

核兵器として核融合を実現するためには、今のところ、核分裂による「超高温」を利用する必要がある

ということに留め、これ以上は踏み込まないことにしよう。

11.2 放射線と放射能

11.2.1 放射線の強さ

単位時間あたりの値

エネルギーなどに絡む量を,

強さ

を表すものとして数値化したい場合, それを

単位時間あたりの量

として定義することになる。したがって, ある地点での熱線の強さは, 単位時間あたりに受け取る熱エネルギーの量であり, また, 放射線の「強さ」も単位時間あたりの量として定義することになる。

ただし, この単位時間の時間経過中に熱線や放射線の「強さ」が変化してしまのでは, 単位時間の選び方に依存してしまい, 良い定義とは言えない。そうなると, その単位時間は短ければ短いほど良く, かといって短ければ短いほど, その単位時間あたりの量は小さくなってしまうので,

極めて短い時間で計測した値を, (例えは) 1秒あたりに換算した値 (の
極限)

を想定して定義することになる。つまり, 正式な定義は, 微分の考え方で定められることになる。

もうひとつの考え方は,

時間により変化せず一定

の場合に限定してしまうことであり, この場合, 最後に単位時間あたりの単位系に書き直す, つまり, エネルギーとしてジュール (J) で表されているならば J/s に書き直す, という後処理をするだけのことなので, 簡単。

最後にもうひとつ,

比較的短時間の現象ならば, その時間で受け取る量そのものを, その現象の「強さ」と言ってしまっても良いだろう

という、日常言語的表現がある。

皮膚に 4 cal/cm^2 の熱量を受ける地点

と言った場合、それは、その地点での熱線の強さを言っている（感じが良く出ている）。正確には熱線の「強さ」は時間と共に変化し、 4 cal/cm^2 という値は、強さが変化する熱線が結果的に与える総量なのだが、「ピカッ」と言う程度（おそらく1秒より小さい）であろうと、8秒間という長い照射であろうと、被害という意味では、結果としての総量を「熱線の強さ」を言っても、納得できると思う。

いずれにせよ、正確な表現に修整する手続きは、あまり難しくない。

「単位面積あたり」と「単位体積あたり」

熱線の強さは、単位時間あたりに

その熱線を受ける（そして熱線に直交する）単位面積あたり

での受け取る熱エネルギーとして定義される。ここで、単位面積あたりとしている理由は、熱線がすべて（表面近くで）吸収されるとしているためであり、多くの生き物（例えばアライグマ）のように不透明な身体を想定しているためである。

一方、ガンマ線に対しては、アライグマの身体は不透明とは言い切れない。ガンマ線を光子の粒と考えるならば、身体を透過していく光子も存在するし、その比率は、ガンマ線の波長が短い場合には（それぞれの光子のエネルギーが高い場合には）それなりに大きい。そして、アライグマに害を与えるのは、透過に失敗した光子である。極端な話、身体を完全に透過する放射線ならば、アライグマにとって無害なのだ。

つまり、物体に対する放射線の与える影響は、表面だけではなく内部も含めての物体に対する影響となるので、体積当たりの量として定義するのが自然なわけだ。

remark. 純粹に物理学として「放射線の強さ」を定義したいならば、やはり、その表面で放射線の全量を吸収する（つまり、その放射線に対して完全に不透明な）物質を想定して、単位面積あたりの照射量を測るのが、すっきりしている。しかし、放射線の強さが問題となるのは、その影響（特に人体に対しての影響）なので、放射線の流れとしての強さだけでは済まないのだ。

それでは、単位体積当たりでの放射線が与える影響を定量化したいのだが、これは、

どの物質を通り抜けるのか

に依存する。それが乾燥した空気なのか、水なのか、鉛なのかの違いにより、放射線が通り抜けられる率は変わるので、物質を指定しないことには、定義のしようがない。

remark. それでも、例え乾燥空気ならば、それを圧縮すれば、その密度に比例して「通り抜けに失敗する率」、つまり、影響を与える率が変わることは分かっている。したがって、原子としての「どのような物質なのか」に依存して定義することは避けられないにしても、

単位質量あたりの影響

として定義すれば、少なくとも密度に対する依存性は、避けることができる。

物質との相互作用

ガンマ線のみに限定して考える。

単位体積当たりの影響を定義するという方針が定まったので、次に問題になるのは、ガンマ線と物質との相互作用である。この辺りは、物理出身の独擅場であり、ラザフォード散乱、光電効果、コンプトン効果、電子対生成、光核反応など、物理学科向きの話題のオンパレードとなる。だが面倒なので、まず、極端な単純化をして、

ひとつの光子が「通り抜け」に失敗する場合、そのエネルギーは原子から電子をはじき出すことに用いられ、光子は消滅する（これは光電効果）

としてみよう。

ガンマ線の遮蔽を考えているならば、ものごとは簡単であり、通り抜けに失敗した光子は遮蔽されたことになる。

一方、放射線の強さを、その場所に置かれた物質への影響として測ろうとしている場合、通り抜けに失敗した光子が、「物質への影響」を与えることになる。さらに、

- 放射線の被害は、それのもたらす電離によるので、
- 被曝によって生じた電離の量を測れば良い。

これは、想定している物質の種類に依存する。これも面倒なので、（乾燥した）空気を考慮することにして、

一辺の長さが 10 cm の立方体の空気（の入った仮想的な箱）を想定し、その一つの面からガンマ線を照射するとき、その箱の中で（単位時間に）生じる電離の量を、ガンマ線の強さと定義する。

こうして、ガンマ線の強さを定義することができた。さらに、電離の量とそれに必要なエネルギーの量の関係は、比較的容易に分かるので、「その箱の中の空気が（単位時間に）ガンマ線の照射から受け取ったエネルギーの量」として、ガンマ線の強さを定義しても良い。

しかし、これで良いのだろうか。「単位体積あたりの」を「一辺が 10 cm の体積あたりの」に固定してしまったのだが、これでは、速度の定義を「10 秒間の移動距離」として定義しているようなもので、物理の定義らしくない。実際には、空気の遮蔽効果により、この立方体の中でのガンマ線の強さは、僅かにだが変化しているはずだ。やはり、物理の定義としては、

小さな立方体の空気

を考えて、そのサイズをどんどん小さくした極限を考えたいのだ。

ここから、不幸な状況が始まる。

ガンマ線（例えば 2 MeV のガンマ線）の、ひとつの光子が電子をはじき出したとき（電離させたとき）、電離に必要なエネルギーは光子のエネルギーに比べて遙かに小さいので、光子のエネルギーのほとんどは、はじき出された電子の運動エネルギーとして与えら、この高速の電子（これを δ 電子線ということにする）が、新たな電離を次々に引き起こす。想定している（仮想的な）箱のサイズが比較的大きいときは、箱の中で発生した δ 電子線の生じさせる電離も、箱の中で完結する（つまり、 δ 電子線の飛程は箱のサイズに比べて小さい）。しかし、箱のサイズが小さいと、

- その箱の中で発生した δ 電子線が箱の外で電離を生じさせることもあるし、また、
- 箱の外で発生した δ 電子線が箱の中で電離を生じさせることもある。

こうなると、「光子がエネルギーを与える」というイベントに着目するか、それとも、「電離が生じる」というイベントに着目するかで、定義が別れることは、覚悟しなければならない。

最初の「光子は消滅する」という「極端な仮定」を除くと、さらに状況は混迷する。ガンマ線のようなエネルギーの高い光子は、電子と相互作用をしても（電離させても）消滅することは少なく、エネルギーの一部を与えるだけで、向きを変えて飛び続ける（コンプトン散乱）。したがって、一つの光子が小さな箱の中で最初の電子を弾き飛ばしても、その箱の中で消滅するとは限らない。そのため、小さな箱の場合、

その箱に入ってくる光子のエネルギーと、箱から出て行く光子のエネルギーの差

を考えて、それをもって、ガンマ線がその箱に与えたエネルギーとしなければならない。

ここで、さらなる不幸な状況が。

ガンマ線が発生させた δ 電子線は、制動放射という（古典的な電磁気学的な）作用により、新たな光子を発生させる。

かくして、放射線についての教科書に書かれた「どこが違うか良くわからないいいつつもの定義」により、苦しめられることになる。

第12章 Appendix

12.1 単位系

12.1.1 力と圧力

- 1 kgf : 1 キログラム重, もしくは 1 重量キログラム。

1 kg の重さの物体が, その重量として与える力。例えば, 体重 73 kg の人がその体重により体重計に加える力は 73 kgf であり, これは感覚的に捉えやすい。

しかし, この「73 kg の重さの物体」は地球表面の標準的場所に置かれて初めて, 73 kgf の力を与えるのであり, 「その物体の何らかの属性」ではなく「その物体と地球の両者により決まるなにか」に過ぎない。

物理学では, 「キログラム」は慣性の法則に基づく物質の質量であり, 重力に基づく単位ではない。したがって, 「キログラム重」, 「重量キログラム」における「重」や「重量」を省略することは出来ない。

力の単位としては, 次のニュートン N を用いる。

- 1 N : 1 ニュートン。

重量キログラムとの関係は,

$$1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N}$$

と定義されている。

1 N の定義は,

質量 1 kg の物体に 1 m/s^2 の加速度を与える力

である。それでは質量（慣性質量）の定義はというと, 歴史的には,

1. 物体の重さとしてのキログラム, つまり重量キログラムが先に定められ,

2. 1 kgf の質量の物体を落下させたときの加速度を測定することにより, 定数 $g = 9.80665$ (標準重力加速度としての数値) が定められ,
3. しかし, この値は, 正確には地球上の場所に依存するので, この値を定義値としてしまい,
4. $1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N}$ と定義した

ということである。結局, 1 kg は, 重力加速度が標準重力加速度と一致するような場所における 1 kgf の物体が地球の引力により受ける力なのである。

ついで、持て回った定義をしているような印象を受けると思うが, 地球上の特定の場所に依存した定義は, どこかで依存性を明示して定義し直すことが必要なのである。

確かにこれが歴史的定義なのだが, いったん定義が確立されると, こんどはもっと基本的で精密な測定が可能な現象に基づいて, 慣性質量 1 kg の定義が修正されることになる。その場合でも, 1 kgf と 1 kg の換算値 9.80665 は「定義値」なので変更することではなく, 標準となる「地球上の場所」がわずかに変わることになるが, この変化は, 他の様々な要因に依存する変化に隠され, 実際にはなにも変更されていないに等しい。

なお,

2 つの物体の引力に基づく「重さの比」が, それらの物体の加速度に基づく「質量の比」と常に一致する

ということは仮定している (一般相対性理論を根拠としない限り自明とは言えない)。

- 1 P : 1 パスカルであり, 圧力の単位。1 m^2 の面積に対して 1 N の力を加える圧力として定義される。
- 1 標準気圧 : 高気圧でも低気圧でもない標準の気圧であり,

$$1013.25 \text{ ヘクトパスカル} = 1013.25 \times 10^2 \text{ P} = 1.01325 \times 10^4 \text{ P}$$

と定義されている。わざわざヘクトパスカル (100 パスカル) などという半端な単位を用いるのは奇妙に思えるのだが, これは cm と g を用いて組み立てられた単位ミリバールから m と kg を用いて組み立てられた単位パスカルへの変更に伴い, 数値を変更しないで引き継ぐことが出来るように調整した結果である。

- 力と圧力に関するその他の単位：これは、科学の世界では現代のアメリカ人と昔のヨーロッパの人間の使う単位であり、距離としてフィートやマイル、重さとしてポンドを用いることによるガラパゴス化なので、無視して良い……はずなのだが、残念なことに、ここでの引用文献は、最も核実験のデータを持っているアメリカで書かれたものなので、常に換算が必要になる。これは、そのつど、

- $1 \text{ ft} = 30.48 \text{ cm}$
- $1 \text{ in} = 1/12 \text{ ft} = 2.54 \text{ cm}$
- $1 \text{ y} = 3 \text{ ft} = 0.9144 \text{ m}$
- $1 \text{ mi} = 5280 \text{ ft} = 1.609344 \text{ km}$
- $1 \text{ lb} = 0.45359237 \text{ kg}$

を用いて換算しなければならないので煩わしい。幸いなことに、どうせ概算値しか必要ないので、

- 1 フィート : 1 ft は、約 30 cm
- 1 ヤード : 1 y は、1 m より少し少ない
- 1 マイル : 1 mi は、1.6 km
- 1 ポンドは : 1 lb は、1 kg の約半分

といった具合に、場当たり的に適当な概算をしても、困ることはない。

12.2 物理学の定数

- $1 \text{ kcal} = 4.184 \times 10^3 \text{ J}$
- $1 \text{ kt(TNT)} = 1 \times 10^9 \text{ kcal}$
- ケルビン (K) と 摂氏 (°C) : $T \text{ K} = (T + 273.15) \text{ °C}$
- 気化熱 : 539 kcal/L
- 地球の大気の総重量 : $5.3 \times 10^{18} \text{ kg}$
- 空気の比熱 : 0.24 cal/g
- $1 \text{ eV} = 1.6021766208 \times 10^{-19} \text{ J}$