

# 第 7 章



## 第7章 热線とその効果

### 第1節 火の玉からの放射

#### 热線の一般的性質

7.01 核兵器と通常の高性能爆薬との重要な相違点の一つは、核爆発エネルギーの大きな部分が熱線放射の形で放出されることである。核兵器では単位質量当たりの放出エネルギーが莫大であるため、非常な高温に達する。核爆発時の温度は、通常の爆薬の場合では2,000～3,000度であるのに比べて、数千万度であろうと推定されている。このような高温のため、全エネルギー(残留放射能のエネルギーを除く)の約70～80%が短波長の電磁波の形で放出される。当初、(第1次)热線は主として軟X線のスペクトル領域であるが、約50マイル以下における空中爆発では、そのX線は爆発点付近の空気に吸収されて、その空気を加熱して高温にする。残りの20～30%の爆発エネルギーの大部分は、当初兵器残片の運動エネルギーの形である。この運動エネルギーも直ちに空気に吸収され(2.109)空気を更に加熱する。加熱された空気は、それが火の玉を形成するのであるが、次に地上付近における太陽光線とほぼ同じスペクトルで熱放射する。それが火の玉からの热放射(紫外線、可視光線、赤外線)であり、光速で伝播(ば)して爆発点から遠くでは热線となる。従って、この(第2次)热線が火の玉から放射してから数マイル離れた目標に到達するまでの間の時間経過は、全く意味のことである。

7.02 本章において使用する「热線」の意義を明確にすることが望ましい。実際に核爆発によって放出される全エネルギーは、兵器の破片から出る残留放射線も含み、最終的にはすべて热エネルギー即ち热に変わる。しかし、そのうちのある部分のみが、地表付近において火災や人員の火傷をもたらすここでいう热線の形成に関与する。初期に火の玉から放射される热線のうちあるもの、特に紫外線は、加熱空気中の各種原子・分子によって選択的に吸収され、徐々に変衰した形即ち長

波長で再放射される。その目標物への到達時間の遅れや放射速度の低下により、熱線の破壊効率は落ちる。そのため、これ等の遅れて出る放射熱線は本章では熱線とは考えない。従って、爆発後1分以内に火の玉の加熱空気から放射される有効な（即時）熱放射を「熱線」と定義づけるのが好都合である。

7.03 高度約100,000フィート（ほぼ19マイル）以下の空中爆発では、第2章で述べたとおり熱線は火の玉から2つのパルスとして放出される。第1のパルスは非常に短かく、全放射エネルギーのはば1%である（2.39）。第2のパルスは一段と顕著で長時間続く。有効な熱線パルスの全長は爆発出力とともに増加する。例えば1KTの空中爆発による有効パルス長は約0.4秒であるが、10MTの爆発によると20秒以上である。熱線パルスの性質は爆発高度の増加とともに変化する（2.130以後）。高度約100,000フィート以上においては、熱線パルスは1つしかなく、その有効長は、爆発高度と爆発出力により異なるが、MT級のもので1秒以下のオーダーである。約270,000フィート（51マイル）以上の爆発では、パルス長はいかに長くなる。

7.04 約100,000フィートまでの通常の空中爆発においては、全爆発エネルギーのはば35～45%が有効な熱線として放射される。実際に熱線として現われるエネルギーの割合は、その核兵器の特性とともに爆発出力とにより定まる。各種爆発出力及び爆発高度に対するこの割合の推定要領は後で述べる（表-7.88）。しかし単純化して、空中爆発の全エネルギーの約35%が熱線エネルギーとして放射されると多くの場合仮定される。このことは、放出エネルギー1KT TNT当量について約0.35KT即ち $3.5 \times 10^{11}$ カロリー又は約410,000kw/時が熱線の形であることを意味する。地表面に到達する熱線エネルギーの割合は爆発点からの距離と大気の状態によって定まる。

7.05 空中爆発は大きな爆風による損害をもたらすことができるが、熱線が枯葉や新聞紙のように小さく切れたり薄っぺらな可燃物を発火させて一層大きな損害をもたらすことができる。建物や森林内で発火し相当の距離まで急速に延焼する。更に熱線は薄い可燃物が発火しないような距離においても、照射された人員

の皮膚に火傷を起こしたり目に傷害を起こしたりすることができる。事実、熱線が他の効果の及ばない距離においてさえ、直接の照射と火災の両方で人員負傷させる重要な原因となることがある。

### 熱線の減衰

**7.06** 热線により負傷又は損傷する範囲あるいは可燃物が発火する可能性は、皮膚、繊維又はその他の照射された物質が短時間内に単位面積当たり受ける熱線エネルギーの量に大きく依存する。ある爆発からある面に届く熱エネルギーは、2つの理由で距離が大きくなるに従い少なくなる。(1)火の玉から離れるに従いある量の熱線を受ける面積が増加して熱線の拡散。(2)空気中を通過する途中での熱線の減衰。順を追ってこの2つの要因を考察する。

**7.07** 热線は全方向に均等に分配されると仮定すると、爆発点からの距離Dにおいては、同じエネルギー量が半径Dの球面上の各単位面積に到達する。この球の全表面積は $4\pi D^2$ であり、爆発による熱放射エネルギーをEとすると、大気による減衰が仮にないとすると、距離Dにおいて単位面積当たり受けるエネルギーは、 $E/4\pi D^2$ である。明らかに、この値は爆発点からの距離の2乗に反比例する。例えば爆発点から2マイルにおいて単位面積当たりに受ける熱エネルギーは、その半分の距離即ち1マイルにおいて受ける量の $\frac{1}{4}$ である。

**7.08** 実際に単位面積当たりに到達する熱エネルギーの量を見積るために大気による熱線の減衰をも考慮しなければならない。この減衰は2つの主な原因即ち吸收と散乱とに起因する。空気中に存在する原子や分子は、熱線のある部分を吸収し取り去る能力がある。短波長の光線（紫外線）に対しては、吸収が最も効果がある。これに関しては、大気中の気体からできる（2.123）オゾン、二酸化窒素、亜硝酸とともに酸素分子が重要な役割を演ずる。

**7.09** 热線、特に紫外線は、吸収のために爆発点からの距離が増加すると急激に減少する。吸収された熱線のうちいくらかは後で再放射されるが、2次放射は全方向に対して同じ確率で行われるため目標方向に進む量は実際に減少する。その結果、爆風及び初期放射線の効果に対して生き延びることができた人員が熱線照

射を受ける距離においては、紫外線の割合は非常に小さい。しかし、紫外線は可視光線や赤外線に比較して生物学的傷害を引き起こし易いため、ある条件下では少量の存在さえも重大なことがある。

**7.10 散乱による減衰**、即ちもとの進路からの無秩序な方向変換は、全波長にわたり起こる。散乱は空気中に存在する酸素や窒素のような分子によっても起こるが、これは大気中のほこり・煙・霧のような微粒子で光線が反射したり、屈折（又は屈曲）したりして起こる散乱のようには重要ではない。散乱の相互作用による方向変換は、熱線の直接的な伝播よりも、何か拡散してゆくような感じとなる。

### 大気の状態の影響

**7.11 空気中の微粒子が起こす散乱による熱線エネルギーの減少**は、微粒子の粒径と濃度のような大気状態と熱線の波長とにより決定される。このことは、波長の異なる熱線、即ち、紫外線・可視光線・赤外線では、エネルギー減衰の程度が異なるということを意味する。しかし、実用に限っては、熱線の全波長にわたり平均化した平均減衰を仮定するのが、正確性には欠けるものの、便利でかつ比較的満足できる。

**7.12 大気が熱エネルギーを減衰させたり、視度を制限する程度は、電磁波の散乱に大きく依存している。**従って散乱に関する限り、大気の状態は、「昼間視程」又は簡単に「視度」として知られているものに代表させることができる。これは、水平線上にある大きな黒い物体が昼の光のもとで周囲の空から識別できる最大距離として定義される。大気の状態と視度との相関関係を示す国際コードは表-7.12のとおり。

表-7.12 視度と大気の状態

| 大 気 の 状 態 | 視 度 |       |
|-----------|-----|-------|
|           | km  | マ イ ル |
| 見通し例外的に良好 | 280 | 170   |
| 見通し非常に良好  | 50  | 31    |
| 見通し良好     | 20  | 12    |
| 軽いもや      | 10  | 6     |
| もや        | 4   | 2.5   |
| わずかな霧     | 2   | 1.2   |
| 軽い霧～深い霧   | 1以下 | 0.6以下 |

7.13 直感的には、爆発点からの距離の増大により熱線エネルギーが減少する程度は、視度の小さい時の方が視度の大きい時よりも大きくなることが予想される。しかし、後に述べる理由で、視度が最小限中程度に良好（10マイル以上）より大きい場合は、視度の約半分以下の距離では熱線の減衰度は大気の状態に比較的無関係であることがわかっている。所が更に遠く離れると、視度の減少に従って放射エネルギーの大部分が実際に失われる。概略の近似としては、核爆発からある距離離れた位置において受ける熱線の量は、視度に無関係とみなしてもよい。このことは、視度の $\frac{1}{2}$ より遠くでは過大に見積ることになるが、熱線防護の見地からすると過小に見積るよりも好ましいであろう。

7.14 爆発点からある距離離れた所で受ける熱線は、直接伝播してくる（非散乱）熱線と散乱熱線とからなる。空気が清澄で懸濁している微粒子が非常に少ない場合、散乱の程度は小さく、受ける熱線は実際上散乱することなく直接伝播してくるもののみである。微粒子が空気中に中程度懸濁している場合、直接伝播してくる熱線の量は、清澄な大気中よりも少ない。しかし、このような減少分は、考えている物体（又は地域）に到達する散乱熱線が増加することで大幅に埋め合わせされる。多重散乱、即ち既に散乱した熱線が次々と行う散乱は、微粒子の濃度が高い場合には非常に起こり易く、目標に対して多方向から熱線を到達させる。そ

こで、直接伝播する熱線の他に、かなりの量の熱線が間接的にある地域に到達するであろう。ある制限のもとで、ある距離において単位面積当たりに受ける核爆発からの全エネルギーの量は、あまり大きく視度に左右されないというのは、多重散乱による部分的な埋め合わせによるからである。

7.15 雨・霧・濃い煙霧のような気象状態では、空気の水蒸気及び炭酸ガス含有量の増加による吸収が、熱線の減衰に顕著な役割をはたす。散乱や吸収により直接伝播する熱線が失われた分は、ここでは多重散乱で埋め合わせをすることはできない。従って視度の良好な状態に比較して、爆発点からある距離において受ける熱線エネルギーは少ない。

### 煙・霧及び雲の影響

7.16 空中爆発が濃い雲・煙・霧の層の上で起こった場合には、それらの層の上から上空に熱線のかなりの部分が散乱する。この散乱した熱線は、地上から見ると散逸したと考えてもよい。その上、透過してくる熱線の大部分は散乱し、直接伝播によってはほとんど到達しない。この2つの効果のため、霧又は煙の層でおおわれた地上目標に対し、層の上で起こった核爆発から到達する熱エネルギーの量は大幅な減少をきたす。

7.17 霧や煙による熱線の減少は、爆発点が霧等の層の上又は程度は小さくなるがその中にいる場合にのみ起こることを知っておくことが重要である。空気が中程度に清澄な時に雲又は霧の下側で爆発が起こるような場合には、通常では宇宙空間に逃げてゆくはずの熱線のある部分が散乱して地上に返ってくる。その結果、雲や霧のおおいがない時の同じ大気の伝播状態の場合よりも、実際に受ける熱エネルギーが大きくなることがある。〔地上の積雪は、爆発点上空にある雲の層より一層大きな反射効果を有する。(7.43・7.100)〕

### 遮蔽(しゃへい)効果

7.18 核爆発による熱線は、散乱しないかぎり通常の光と同様に火の玉から直線的に進む。対象物と火の玉との間に壁・兵・木のような堅固で不透明な物質は、遮蔽物として作用し、熱線から防護されたところをつくる。ほとんどが日

本において核爆発後に観測されたものであるが、そのような例をいくつか後で述べる。一方、ガラスやプラスティックのように透明な物質は、熱線をわずかに減衰させるだけで透過させる。

7.19 目標と火の玉との中間にただ介在するだけで目標物をとり囲んでいない遮蔽物では、霧やもやのかかった気象状態の時には完全に効果的ないことがある。特に爆発点から遠くにあっては、受ける熱線の大部分は多重散乱をしており、単に爆発点の方向からだけでなく全方向から到達する。このことは、熱線遮蔽の問題を検討する際留意する必要がある。

### 爆発型式

7.20 今迄の論議は、特に空中核爆発による熱線に関して述べたものである。その他の爆発型式においても全般的効果は同じであるが、その程度に差がある。火の玉が実際に地面又は水面に接する地上爆発では、遠くで熱線として現われる爆発エネルギーの割合は空中爆発に比較して小さい。エネルギーのうちいくらかは地表物質の融解や蒸発に消費するが、その量は比較的少なく（約1～2%）、熱放射に及ぼす影響も小さい。爆発点から離れた場所で受けるエネルギーにとっては、それ以外の要因がもっと重要である。第1に地形の不規則性によりある程度遮蔽があり、第2に爆発初期爆心地付近に生ずるちり又は水蒸気の層の中で吸収が起こる。その上、地上目標に到達する熱線の大部分は、地上付近の空気の中を通過する。大気のこの部分では、水蒸気及び炭酸ガス分子による吸収が相当あり、各種微粒子による散乱の程度も高度の高い所に比べて大きい。その結果、地上爆発では爆発点からある距離離れた場所で受ける熱エネルギーの量は、同一爆発出力の空中爆発で受ける量の $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{3}{4}$ であろう。しかし、航空機からのように上空から見た場合には、地上爆発は空中爆発と同様の熱線の特性を示す。

7.21 地下爆発においては、火の玉が大きく地表面を貫通して出ないかぎり、地中・水中にかかわらずほとんどすべての熱線が吸収される。熱エネルギーは、場合によって土壤の加熱及び融解、あるいは水の蒸発に使用し尽される。従って、空中爆発にともなうような通常の熱線効果は存在しない。

注:(1) 理想的輻射体(完全黒体)から放射される光の波はエネルギー的に最大密度を示すことが理論的にも実験上からも確認されており、核による“火の玉”がこれに類似している。

多少の増減はあるが温度的に約7,500°K(1,300°F)以上であり、この最高温度では紫外線及びX線帯のスペクトルを示す。

7.22 核爆発が100,000フィート以上の高空で起こった場合、非常に高温となっている兵器の残りから出る第1次熱X線は、2.131以後で説明したとおり低密度のために大量の空気に吸収される。その結果、火の玉の温度は低空爆発(7.81)のように高くならず、吸収されたエネルギーの約半分は1秒以内に熱線として放射されるが、残った熱エネルギーは非常にゆっくりと放射されて、有意義な効果は期待できない。

## 第2節 热線の効果

### 热線の吸收

7.23 核爆発から単位面積当たりに到達する熱エネルギーの量は、爆発出力・爆発高度・爆発点からの距離及びある程度は大気の状態によって決定する。火の玉から出る熱線は、遠紫外線から可視光線・赤外線と広範囲にわたる。ほとんどの紫外線は、大気を通過の途中に散乱又は吸収されて、地上付近の目標の所において受ける紫外線は、火の玉の温度から予想されるよりは少ない。<sup>(1)</sup>

7.24 物質又は物体上に熱線があたる場合、ある部分は反射し、ある部分は吸収され、残りがある場合にはそれは透過して最終的には他の物質にあたる。物質によって吸収された熱線は熱を発生して、その物質がこうむる損害の大きさを決定する。入射した熱線が吸収される量は、その物質又は物体の性質と色とによって決定される。よく反射する物体又は透明な物体は熱線をほとんど吸収せず、比較的熱線効果に対して抵抗性がある。薄肉な物体は、多くの場合到達する熱線の大部分を伝導してしまい、重大な損傷をまぬがれる。黒い布地は、白い同種類の布地に比較して入射熱線の吸収割合がずっと多いので、黒いものの方が白いものよりも影響を受け易い。淡色のものは、同一物質の濃色のものの様には容易に焦げない。

7.25 基本的にはすべての吸収された熱線は、吸収した物質を加熱するのに使用され、そこで得られた高温が人員に傷害を与えたり、物質を損傷したり、可燃物

を発火させたりする原因となる。核爆発による熱線について重要な点は、単にそのエネルギーが大きいだけでなく、それが非常に短時間の間に放射されることである。このことは、照射強度即ちある表面へ入射する速度が非常に大きいことを意味する。この強さのために、熱線の吸収とともに生じる熱は非常な高速度で生成される。

7.26 热線が放射している短時間内では、熱伝導によっては少量の熱しか消散しないので——多分金属のような熱の良導体を除く——吸収されたエネルギーは物質の浅い表面部分に強く局限される。その結果、表面では非常に高温となる。例えば、日本における核爆発では、爆発点直下の地上にある堅固な物質では表面温度が $3,000\sim4,000^{\circ}\text{C}$  ( $5,400\sim7,200^{\circ}\text{F}$ ) になったであろうと推定されている。爆発点からの距離の増大とともにその温度が急速に降下することは事実であるが、3,200フィート (0.61マイル) 離れた所で $1,800^{\circ}\text{C}$  ( $3,270^{\circ}\text{F}$ ) に達したという例がある (7.47)。

7.27 热線の吸収がもたらす高温の最も重要な物理的効果は、皮膚の火傷と、木材・繊維製品・紙のような可燃性有機物質を焦がしたり、炭化したり、場合によっては発火させたりすることである (図-7.27)。热線に照射された場合には、軽い布地・新聞紙・枯草・枯葉・朽木のような薄肉又は多孔質の物質は燃え上がる。一方、例えば木材 ( $\frac{3}{2}$ インチ以上の厚さ)・プラスティック及び重い布地のような肉厚の有機物質は、炭化はするが燃え上がらない。濃い煙や炎の吹き出しあるが、物質が燃焼し続けることはない。淡色であっても熱線照射の初期の段階で炭化して容易に黒くなると、その後の熱線を容易に吸収する。しかし、初期の段階で生じた煙が、その下にある物質をじ後の熱線から部分的に遮蔽することがある。



図-7.27 核爆発による熱線で車両装飾品が発火し、自動車火災へと拡大した。(ネバダ実験場にて)

7.28 このような性質は、1953年のネバダの実験で被爆したある木造家屋の写真で説明できる。5.55に述べたとおり、熱線を反射して火災の可能性を最小限にするため、家には白く外部塗装をほどこしてある。爆発のその瞬間、図-7.28 a にあるとおり、家の前面は濃く黒い煙におおわれた。しかし炎のあがった兆候はない。その後、爆風波の到着前即ち爆発から2秒以内、では図-7.28 b に見られるように煙は止まる。木材の発火は起らなかった。



図-7.28 a 爆発 1秒後の木造家屋に及ぼす熱線の効果（約25cal/cm<sup>2</sup>）

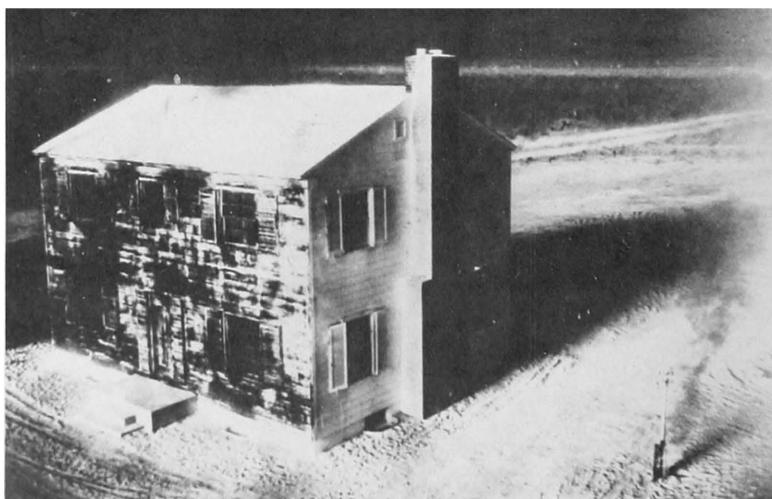


図-7.28 d 約3/4秒後、木造家屋に及ぼす熱線の効果

7.29 热線による物質の発火は、多数の要因により決定するが、最も重要な2つの要因は物質自体の性質は別として、その厚さと含水量である。例えば、ある

物質の薄い切れ端は厚いものより容易に着火し、乾燥したものは湿ったものより簡単に損傷を受ける。

**7.30** 热線が各種物質を炭化又は発火させたり、あるいは皮膚に火傷を起こすことに関して重要な考慮事項は、热エネルギーの到達速度である。照射された物質の単位面積当たりの热エネルギーの量が等しい場合、それをゆっくり受けた時より早く受けた時の方が受ける損傷が大きい。このことは、ある物質に同一熱線効果を生じさせるには、高出力の核爆発では热エネルギーを放出するのに長時間かかる、即ちゆっくりと放出するので、低出力の核爆発よりも高出力の核爆発の方が、(単位面積当たり) 受ける热エネルギーの量が大きくなければならないことを意味する。

**7.31** 低出力の空中爆発か高出力の高空爆発で生起することがあるような非常に短時間の热線パルスでは、この傾向が反対となる証拠がある。換言すれば、1秒の何分の1という非常に短いパルスとして照射する場合は、1~2秒ある中程度のパルスと比べてエネルギーの効率は悪い。ある物質を热線の短いパルスで照射する実験では、表面が急速に劣化して蒸発することが観測された。それはあたかも表面だけが吹き飛んでしまって、残りはほとんど損傷の跡もなかった。外見上、物質に入射した热エネルギーは、热線が物質内部深く侵入する前に表面分子を吹き飛ばす運動エネルギーに変わったかのようであった。

### 皮膚及び目に及ぼす熱線の影響

**7.32** 核爆発による热線の重大な影響の1つに、照射された人員の皮膚が热エネルギーを吸収して閃光火傷を生じることである。その上、眼のレンズの集光作用のため、偶然核爆発を直視した者に対し、目の永久的な損傷をもたらす。しかし、直視ということは全くの偶發のことであり、あまりないであろう。頻繁に起こることが予想され、従って防護行動にとってはとりわけ重要なことは、非常に明かるいための視覚の一時的な喪失(閃光くらみ又はくらみ)であり、特に目が夜暗に順応している夜間はひどい。これは、どの方向を向いていても体験する。人間に及ぼす熱線の各種影響は、第12章で更に深く考察する。

## 繊維・木材及びプラスティックの熱線による損傷

7.33 热線の吸収により表面が高温になるため繊維製品が損傷することについては既に述べた。木綿や羊毛のような天然繊維及びレーヨンのようなある種の合成繊維は焦げたり、炭化したり、あるいは燃焼する。一方ナイロンは、十分加熱されると融解する。繊維がある変化を起こすのに必要なエネルギーは、環境によりさまざまである。しかし、次のような一般則がほとんどの場合適用できるように思われる。

7.34 濃色の繊維は、同じ繊維の淡色ものより熱線を吸収し易く、従って損傷を受け易い。このことに関してさえ、染色法や繊維の素質によってさまざまに変化する。羊毛は木綿やレーヨンに比べて放射エネルギーに対する抵抗性があり、木綿やレーヨンはナイロンよりは影響を受け難い。オーロンは、ナイロンより相当の抵抗性が大きいと思われる。軽い布地（ある面積について）は、重い布地に比べて損傷を起こさせるのに必要な熱エネルギーは少ない。同じ照射時間で損傷させるのに必要なエネルギーは、単位面積当たりの布地重量に比例する。含水量が中程度の布地は乾燥しているものと同様の性質を有するが、含水量が更に多くなると損傷するのに多くのエネルギーを必要とするようになる。

7.35 各種繊維製品に及ぼす熱線の影響について広汎な研究を行ってきたが、大きな影響を及ぼす要因が多いために要約することは困難である。しかし、努力の結果、表-7.35には熱線の吸収によって各種繊維製品が発火（又は損傷）するのに必要な照射強度の1例を示した。値は物質 $1\text{ cm}^2$ 当たりに入射する熱エネルギーのカロリー単位、即ち $\text{Cal}/\text{cm}^2$ で表わしており、一般に「受熱密度」と言われている。結果は、任意に選んだ $35\text{ K T} \cdot 1.4\text{ M T}$ 及び $20\text{ M T}$ の空中爆発について記述している。7.30で述べた理由で、ある効果を生ずるのに必要な受熱密度は出力とともに増加する。

表-7.35 低空爆発における布地の着火に必要な概略の受熱密度

| 材 料                         | 重 量<br>(OZ/yd <sup>2</sup> ) | 色     | 材料への影響   | 受熱密度 (Cal/cm <sup>2</sup> )* |       |      |
|-----------------------------|------------------------------|-------|----------|------------------------------|-------|------|
|                             |                              |       |          | 35MT                         | 1.4MT | 20MT |
| 服 地                         |                              |       |          |                              |       |      |
| 木 締                         | 8                            | 白     | 着 火      | 32                           | 48    | 85   |
|                             |                              | カーキ   | 曲げると裂ける。 | 17                           | 27    | 34   |
|                             |                              | カーキ   | 着 火      | 20                           | 30    | 39   |
|                             |                              | オリーブ  | 曲げると裂ける。 | 9                            | 14    | 21   |
|                             |                              | オリーブ  | 着 火      | 14                           | 19    | 21   |
|                             |                              | 濃 紺   | 曲げると裂ける。 | 11                           | 14    | 17   |
|                             |                              | 濃 紺   | 着 火      | 14                           | 19    | 21   |
| 木綿コールテン                     | 8                            | 茶     | 着 火      | 11                           | 16    | 22   |
| 木綿デニム、新                     | 10                           | 青     | 着 火      | 12                           | 27    | 44   |
| 木綿シャツ地                      | 3                            | カーキ   | 着 火      | 14                           | 21    | 28   |
| 綿・ナイロン混紡                    | 5                            | オリーブ  | 曲げると裂ける。 | 8                            | 15    | 17   |
|                             |                              | オリーブ  | 着 火      | 12                           | 28    | 53   |
| 羊 毛                         | 8                            | 白     | 曲げると裂ける。 | 14                           | 25    | 38   |
|                             |                              | カーキ   | 曲げると裂ける。 | 14                           | 24    | 34   |
|                             |                              | オリーブ  | 曲げると裂ける。 | 9                            | 13    | 19   |
|                             |                              | 濃 紺   | 曲げると裂ける。 | 8                            | 12    | 18   |
|                             | 20                           | 濃 紺   | 曲げると裂ける。 | 14                           | 20    | 26   |
| 雨 衣(ネオプレンをコート<br>したナイロンの綾織) | 9                            | オリーブ  | 融解開始     | 5                            | 9     | 13   |
|                             |                              | オリーブ  | 曲げると裂ける。 | 8                            | 14    | 22   |
| 掛け布                         |                              |       |          |                              |       |      |
| レーヨンのギャバ                    | 6                            | 黒     | 着 火      | 9                            | 20    | 26   |
| レーヨン・アセテート                  | 5                            | ブドウ酒色 | 着 火      | 9                            | 22    | 28   |
| レーヨンのギャバ                    | 7                            | 金     | 着 火      | **                           | 24 f  | 28 f |
| 裏付綾織 レーヨン                   | 3                            | 黒     | 着 火      | 7                            | 17    | 25   |
| 裏付綾織 レーヨン                   | 3                            | ベージュ  | 着 火      | 13                           | 20    | 28   |
| アセテートシャンタン                  | 3                            | 黒     | 着 火      | 10 f                         | 22 f  | 35 f |
| 重い木綿布                       | 13                           | 暗い色   | 着 火      | 15                           | 18    | 34   |
| テント地                        |                              |       |          |                              |       |      |
| キャンバス(綿)                    | 12                           | 白     | 着 火      | 13                           | 28    | 51   |
| キャンバス                       | 12                           | オリーブ  | 着 火      | 12                           | 18    | 28   |
| その他                         |                              |       |          |                              |       |      |
| ベッド掛け(綿シェニル)                |                              | 淡い青   | 着 火      | **                           | 11 f  | 15 f |
| ブラインドのひも(綿、汚れ)              |                              | 白     | 着 火      | 10                           | 18    | 22   |
| ブラインドのひも                    |                              | 白     | 着 火      | 13 f                         | 27 f  | 31 f |
| モスリン窓掛け(綿)                  | 8                            | 緑     | 着 火      | 7                            | 13    | 19   |

\* 所要の変化 (f印のあるものを除く) に対する受熱密度は、実験室標準条件で±25% の確実度と推定される。典型的な野外では、±50%の確実度と推定され、高い方の値を使用するのが望ましい。f印のある物質は、実験室で±50%、野外で±100%の確実度と推定される。

\*\* データがないか、適切な換算が未知のものである。

注:(2) 7.28に見られる家屋の前面に照射された熱エネルギーは約25 Cal/cm<sup>2</sup> である。

**7.36** 热線パルスの形と持続時間は、爆発出力とともに実際に起こった爆発高度によって決定するので、表-7.35の低空爆発における受熱密度は概略の数値である。しかし、3つの項にある受熱密度は、一般に高度100,000フィート以下の核爆発に適用することができ、ここで火の玉の温度が2番目に極大となる時間は、それぞれ0.2・1.0・及び3.2秒である(7.85)。

**7.37** 木材は熱線に照射されると炭化し、炭化の深さは受熱密度にはほぼ比例する。単位面積当たり十分な量のエネルギーが照射されると、大きな木は一時的に炎を出すこともあるが、核爆発によって持続的に燃焼する可能性は恐らくないであろう。しかし、一時的な炎が付近にある直接照射されていない可燃物を発火させることがある。おがくず・かんなくずのように細くなったり、スポンジ状になった場合には、以下に述べるとおり、核爆発の熱線でかなり容易に着火する。

**7.38** 概括して言えば、無塗装で汚れのない松・ダグラスもみ・アメリカ杉・かえでを見る程度に炭化するには、1 cm<sup>2</sup> 当り約10~15 Calの熱エネルギーが必要である。黒く汚れると木材が炭化し易くなるが、明かるい塗料や硬いニスを塗ると防護力が出る。(2)

**7.39** ガラスは熱に対して非常に抵抗性があるが、非常にもらいでの、粉碎防止のために自動車の風防ガラスのように透明又は半透明のプラスティックに換えたり、プラスティックの薄い層で接着したりする。これ等のプラスティックは有機化合物であり、熱により分解する。しかしながら、ベークライト・セルローズ・アセテート・ルーサイト・プレキシガラス・ポリエチレン・テフロンのような多くのプラスティックがかなりよく熱線に耐えることがわかっている。表面が融けたり黒ずんだりするには、少くとも60~70 Cal/cm<sup>2</sup> の熱エネルギーが必要である。

#### 各種物質の着火に必要な受熱密度

**7.40** 実験室及び核実験場において、各種家庭用品及びその他の興味ある物質が着火するのに必要な受熱密度が研究されて来た。任意に選んだ3つの爆発出力について低空爆発の結果を表-7.40に示してある。7.36に注記してあるのと同じ条件及び制限事項を本表においても適用する。この受熱密度は高度100,000フィート以下の爆発に対して適用できる。

表-7.40 低空爆発における各種物質の着火に必要な概略の受熱密度

| 材 料   | 重 量<br>(OZ/yd <sup>2</sup> ) | 色    | 物質への影響      | 受熱密度(Cal/cm <sup>2</sup> )*<br>35MT・1.4MT・20MT |
|---|------------------------------|------|-------------|--|
| 家庭内の燃易いもの                                   |                              |      |             |  |
| 新聞紙・切りきざんだもの                                | 2                            |      | 着 火         | 4 6 11   |
| 新聞紙・黒い写真                                    | 2                            |      | 着 火         | 5 7 12   |
| 新聞紙・字の部分                                    | 2                            |      | 着 火         | 6 8 15   |
| ちりめん紙                                       | 1                            | 緑    | 着 火         | 6 9 16   |
| クラフト紙                                       | 3                            | 黄褐色  | 着 火         | 10 13 20                                       |
| 上等板紙 3号                                     | 10                           | 黒っぽい | 着 火         | 16 20 40                                       |
| クラフト製ボール箱(使用済、平面)                           | 16                           | 茶    | 着 火         | 16 20 40                                       |
| タイプ用紙(新、重ねる)                                | 2                            | 白    | 着 火         | 24 f 30 f 40 f                                 |
| 木綿のぼろぎれ                                     |                              | 黒    | 着 火         | 10 15 20                                       |
| レーヨンのぼろぎれ                                   |                              | 黒    | 着 火         | 9 14 21  |
| 木綿のモップ(使用済)                                 |                              | 灰色   | 着 火         | 10 f 15 f 21 f                                 |
| 木綿のモップ(外気にあてる)                              |                              | クリーム | 着 火         | 10 f 19 f 26 f                                 |
| 紙マッチの青い薬頭                                   |                              |      | 着 火         | 11 f 14 f 20 f                                 |
| かんなくず ポンドロサ松                                | 2lb/ft <sup>2</sup>          | 淡い黄色 | 着 火         | ** 23 f 23 f                                   |
| 屋外の燃易いもの***                                 |                              |      |             |  |
| 乾燥朽ち木(もみ)                                   |                              |      | 着 火         | 4 f 6 f 8 f                                    |
| 落葉(ぶな)                                      |                              |      | 着 火         | 4 6 8  |
| 細い草(いぬむぎ)                                   |                              |      | 着 火         | 5 8 10   |
| 大きい草(すげ)                                    |                              |      | 着 火         | 6 9 11   |
| 松葉(ボンドロサ)                                   |                              | 茶    | 着 火         | 10 16 21                                       |
| 建 材   |                              |      |             |  |
| 巻いた屋根葺き材(無機性表面)                             |                              |      | 着 火         | ** >34 >116                                    |
| 巻いた屋根葺き材(円滑表面)                              |                              |      | 着 火         | ** 30 77                                       |
| ベニヤ板、ダグラスもみ                                 |                              |      | 照射時は炎が出る。   | 9 16 20  |
| ゴム・ラテックス                                    |                              | 白    | 着 火         | 50 80 110                                      |
| ゴム  |                              | 黒    | 着 火         | 10 20 25                                       |
| その他   |                              |      |             |  |
| 0.002インチの航空機用塗料を塗った<br>アルミ製航空機用外板(0.020インチ) |                              |      | 発 泡         | 15 30 40                                       |
| 木綿キャンバスの砂袋(乾燥砂入)                            |                              |      | 破れる。        | 10 18 32                                       |
| さんごの砂                                       |                              |      | 爆発(ポップコーン状) | 15 27 47                                       |
| けい酸砂  |                              |      | 爆発(ポップコーン状) | 11 19 35                                       |

\* 所要の変化 (f印のあるものを除く) に対する受熱密度は、標準的な実験室で±25%の確実度と推定される。典型的な野外では、±50%の確実度と推定され、高い方の値を使用するのが望ましい。f印のある物質は、実験室で±50%、野外で±100%の確実度と推定される。

\*\* データがないか、適切な換算が未知のものである。

\*\*\* これ等の物質が着火するのに必要な受熱密度は、含水率に大きく左右される。

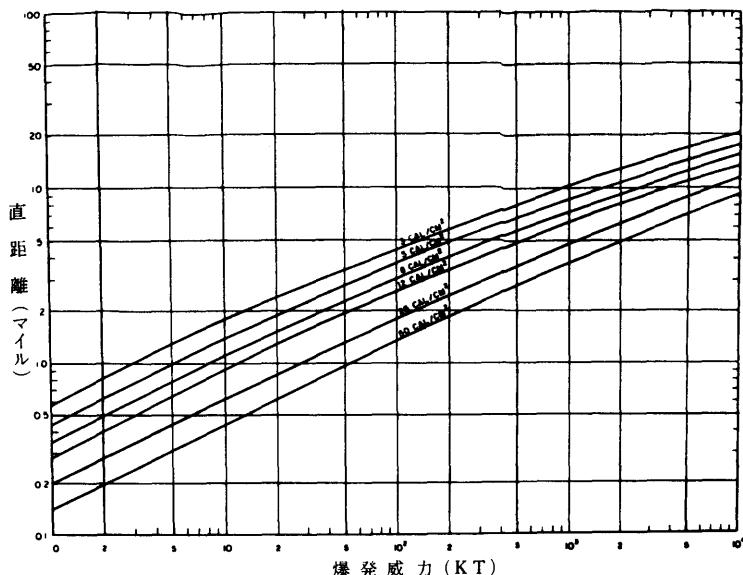
## 受熱密度と直距離

7.41 爆発出力のわかっている核爆発について、特定物質の着火が観測される爆発点からの距離を求めるために表-7.35及び表-7.40を利用するには、熱エネルギーが距離とともにいかに変化するかを知る必要がある。ある爆発出力について、受熱密度の爆発点からの距離に対する変化は、爆発高度・大気の状態（即ち透明度）のような各種要因によって決定される。既に述べたとおり、爆発出力が熱エネルギーとして現われる割合、熱線パルスの性質と持続時間は爆発高度により変化する。更に、爆発高度及び大気の視度で、大気を透過できる熱エネルギーの割合が決定される。

7.42 各種状態について、爆発点からの直距離に対して地上の受熱密度が変化する状況は、好都合なように図-7.42の形で表わすことができる。これ等の曲線は、WをKT単位の爆発出力として爆発高度を $200W^{0.4}$ フィートとして計算したが（7.99参照）、視度12マイル、高度15,000フィートまでの空中爆発による受熱密度はかなり良く見積もることができる。視度12マイルというのは、晴れた日の典型的な都市地域に相当する。高度15,000フィート以上の空中爆発には図-7.42は満足ではなく、7.93以後に述べる手順に従う必要がある。 $180W^{0.4}$ フィート以下のようない下高度の爆発は、基本的には地表爆発であり（2.128参照）、7.101以後の手順に従って受熱密度を計算する必要がある。

7.43 視度12マイルの時に1,000KT（1MT）の空中爆発で新聞紙に火がつく所の距離の見積という例を使って、図-7.42の使用法を説明する。表-7.40によると、新聞紙に火がつく時の受熱密度は1MTで約8Cal/cm<sup>2</sup>である。図-7.42において、出力軸に1MT（ $10^3$ KT）をとり、受熱密度8Cal/cm<sup>2</sup>と記した曲線と交叉するまで垂直線をあげ、その交点に該当する直距離は爆発点から約7マイルであることがわかる。この距離が視度12マイルの時に1MTの空中爆発（高度15,000フィート以下）による熱線で新聞紙を発火させることができ直距離である。大都市にしばしば起るもやがかった気象のもとでは、視度は小さく、着火距離も小さくなるであろう。同様に、爆発点と目標との間に濃い雲や煙があると、

注：(3) 人体に対する日本での熱線による影響は第12章で述べる。



きりと途切れていた。所でそのへいは、熱線の後から到達した爆風によって完全に倒壊してしまった。この熱線は光速で進み、爆風はずつとゆっくり進む(3.09)。

**7.45** 中間で遮蔽物となったものの陰の観測(図-7.45 a 及び図-7.45 b)により、爆心点の方向を相当の精度で標定することができる。その上、爆心地付近の色々の場所の陰を詳細に調べると、爆発高度を求める有力な手がかりが得られる。時によっては明確な半陰影が見つかり、この半陰影から、熱線強度が最大となつた時の火の玉の直径を計算することができる。



図-7.44 a 窓越しに閃光を浴びて焼けた椅子のおおい。(広島においての爆心地から1マイル。 $8 \sim 9 \text{ cal/cm}^2$ )

**7.46** 熱線の衝撃的效果の1つは、研磨した花崗岩(かこうがん)の表面が直接照射で粗くなつたことである。これは岩石を構成する結晶の不均一な膨脹によるもので、観測された結果となるには少くとも $600^\circ\text{C}$ ( $1,100^\circ\text{F}$ )必要であろうと見積られている。花崗岩表面が粗くなりついにははく離する深さから、この温度に達した深さを決定することができる。この観察は爆発時における地上最高温度の計算に用いられる。7.26のとおり、特に爆心地付近においては、地上最高温度は非常に高い。

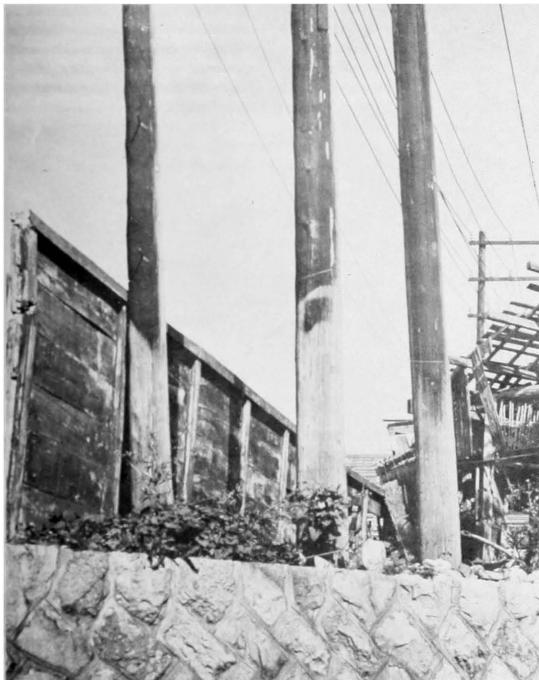


図-7.44 b 閃光で焼けた電柱（長崎において爆心地から1.17マイル、 $5 \sim 6 \text{ cal/cm}^2$ ）。こげていない部分はへいにより熱線から防護されていた。



図-7.45 a 広島におけるアスファルト橋に熱線のため残された閃光の跡。手すりが熱線遮蔽物として作用しており、陰の長さと方向から爆発点が推定できる。

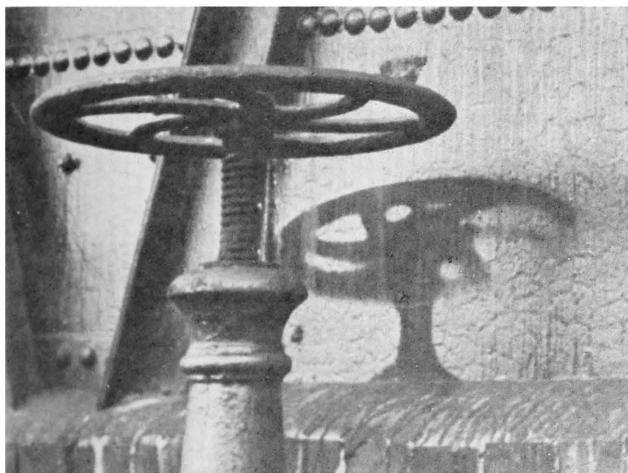


図-7.45 b パルプで遮蔽された部分以外のガスタンクの表面塗料は焦げた（広島における爆心地から1.33マイルの例）

**7.47** じ後の研究に役立ったもう1つの熱線効果は、日本で屋根をふくのに広く用いられている瓦（かわら）の発泡である（図-7.47）。その現象は広島において、爆心地から3,200フィート（0.61マイル）離れた所まで報告されており、そこにおける受熱密度は $45\text{ Cal/cm}^2$ であったと見積られている。泡の大きさと発泡程度は、爆心地に近づくに従って増加し、爆発点と瓦の面との角度が直角になるに従って増加する。同一種類の無きずの瓦を使用した室内実験では、日本で観測されたより瓦の中深く入ってはいるが、4秒間 $1,800^\circ\text{C}$ （ $3,270^\circ\text{F}$ ）に加熱すると同様に発泡することがわかった。この結果から、核爆発においては4秒以内の間、 $1,800^\circ\text{C}$ 以上の表面温度になったと結論することができる。



図-7.47 発泡した瓦：瓦の左側部分は重なっていたため遮蔽されていた。（広島における爆心地から0.37マイル）

**7.48** 日本において、熱線照射を受けた際の淡色と濃色の繊維製品の性質の相違も非常に興味がある。淡色の布地は熱線の大部分を反射、あるいは伝導しほんど吸収しない。そのため、それほど高温には達せず、熱線の大部分を吸収する濃色の布地のようには大きな損傷を受けない。「しま」模様のシャツで、受熱密度約 $7\text{ Cal/cm}^2$ を受けて黒い「しま」の部分が燃えてしまったが、明かるい「しま」の部分が燃え残ったことがあった（図-7.48）。また同様に、約 $5\text{ Cal/cm}^2$ を受けた

紙では、黒インクで書いた文字が燃えて、その他は大きな影響を受けなかった。

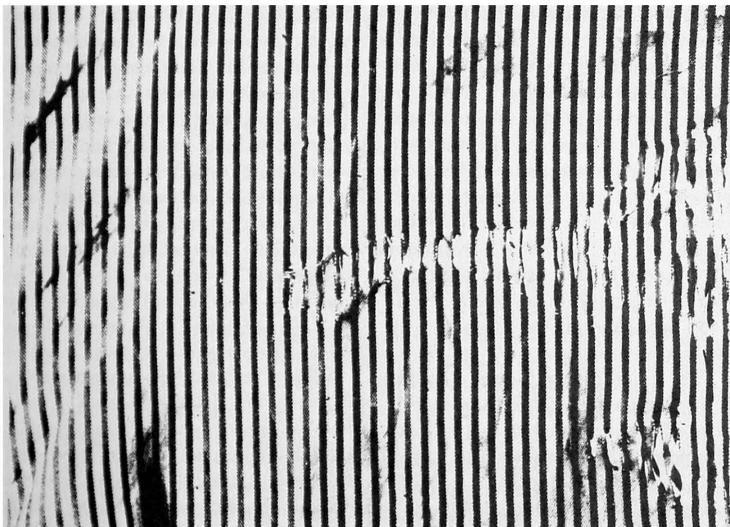


図-7.48 編模様の明るい色の部分はそのままであったが、黒っぽい部分は所々熱線により燃えた。

### 第3節 燃夷（しょうい）効果

#### 火災の発生

7.49 核爆発において、火災が発生する原因には、一般に2通りある。第1は熱線吸収の直接的結果として、薄肉な可燃物が着火する。第2は爆風による破壊の間接的效果として、ストーブ・湯わかし機・炉の転倒、電気のショート、ガス管の破壊によって出火する。出火原因がいかにあろうとも、その後の延焼は、付近の可燃物の量とその分布によって決定される。

7.50 都市地域においては、熱線の直接照射によって着火する可燃物が屋内屋外ともにある。屋内の発火点では、窓やその他の開口部を通して熱線を受けるであろう。屋内のある点において受ける熱線照射は、その点から開口部を通して見える火の玉の割合にはほぼ比例するであろう。熱線が窓ガラスを透過してくる場合に

は、室内に入る量はガラス外部に達する量の約80%であろう。減少する原因は主として反射によるものであり、従って基本的にはガラスの厚さに無関係である。ガラス窓と窓用金網を組み合わせると透過エネルギーは、入射エネルギーのほぼ40～50%に減少するであろう。その上、熱線は日よけ・カーテン等の窓掛けによっても減衰するであろう。勿論、可燃性素材で窓掛けができている場合には、布を張った家具、寝具類、カーペット、紙、布類のように屋内の発火点となる。屋外の発火点は紙、ごみ、窓の日よけ、乾燥した草・木の葉、乾燥した灌木である。屋内での出火は屋外における出火と比較して、持続的な火災へと拡大し易い。しっかりした木造構造物に着火させるには、十分な時間元火を維持するだけの量の可燃物が必要であり、その準備は屋外よりも屋内の方がずっと整っている。

**7.51** 出火から部屋中に火災がひろがるには、詰め物をしたいす・寝いす・ベッド又は木製テーブルのような1～2点の良質可燃性家具に着火し激しく燃え上がらなければならない。火が十分大きくなった後、部屋が「フラッシュ・オーバー」するまでに一般的に10～20分間かかる。フラッシュ・オーバーとは、局部的な火の炎が急に拡がって部屋中一ぱいになることである。フラッシュ・オーバー後、火は激しくなって部屋の区画を突き抜け、他の部屋に拡がる。通常の耐火力を持った部屋では、1つの火元から起こった火炎は、約1時間で最高潮になるものと予想される。

**7.52** 代表的な都市地域においては、通常屋内発火点密度は、屋外発火点密度に比べて非常に大きい。その上、火元からもっと良質の可燃物へ火災が拡大する確率は、既に述べたとおり、屋内の方が屋外よりも大きい。しかしながら、屋外で出火した火災も大きな被害をもたらしうる。枯れた雑草、背の高い枯草・枯灌木へ着火すると、家を燃やす程激しい野火となることもある。ごみ溜めの中にある可燃物は、しばしば、がたがたとなって雨ざらしになった側板のある建物に着火させる。長期間雨ざらしになって朽ちた側板・外板のある建物には、入射する熱線で直接着火することもある。

**7.53** 大部分の熱線は、爆風の前に到達するので、後から到達する爆風は熱線に

より出火した火災の進展に影響する。特に、爆風で火災が消える可能性がある。日本における影響や各種核実験及び高性能爆薬の実験による研究では、相反した結果が出ており、未解決の問題として残っている。都市内部の爆風通過を模造した室内実験では、爆風はほとんど炎を吹き消すが、しばしばすぶりが残り後になって燃え上ることがある。しかしながら、実際に核爆発をこうむった都市目標に、どの程度この様相が適用できるかは未知である。いずれにしても、ある火災は爆風によって消火するが、残りの大部分は間違いなく残っているであろう。

### 火災の拡大

7.54 都市内における火災の拡大は、大火災まで発展することを含めて、その地域の気象・地形・建物の接近度と可燃性・可燃物の量等各種条件によって決まる。前記の火災と爆風の相互作用及び爆風による破壊の程度も、火災の拡大を決定する重要な要素である。第2次世界大戦時日本に対する焼夷攻撃と2度にわたる核攻撃の経験から、発火点が多い時の火災の進展・拡大に関するいくつかの結論が導かれているが、これ等は完全な書物にはなっていない。最近行われた実物及び模型実験から一段と有用なデータが得られた。

7.55 建物間の火災の延焼は、隣の建物の火に加熱された可燃物が着火するか、炎・火の粉・燃えさしに触れて加熱した可燃物が着火するか、あるいは炎又は燃えている燃えさしに触れて熱していない可燃物が着火することによって起こる。対流即ち熱気の流れ、又は放射熱の吸収のいずれかによる延焼は短距離にわたるだけであるが、火の粉による延焼は短距離・長距離のいずれにもわたる。火災の延焼の可能性を検討する際の重要な基準は建物間の距離である。建物密度が低い程、建物間を延焼する確率は小さくなる。都市部、特に爆風によりひどい破壊の起こる爆心地付近においては、状況は相当変わるであろう。地面を連続的に多量の破壊物が覆い、延焼の媒体となる。

7.56  $0.4 \text{ Cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$  程度の低強度の熱線でも長時間照射すると、可燃性建造物の表面はついには炎上する。燃焼中の建物からは、約  $4 \text{ Cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$  の熱反射がある。そのため、燃えている建物からの放射熱で、隣接する建物が着火することが

ある。そのような熱線による着火は、燃焼中の建物の大きさが、建物間距離以上ある場合には、ほとんどの建物間で起こる。非常に風が強い場合には、燃焼中の建物から出る対流性熱気柱が熱放射による延焼距離より遠くまで伸びる。しかし、通常の地形及び気象条件では、対流性熱伝導による延焼が大きな要因となることはないであろう。

**7.57** 火の粉が熱気によって空中に舞い上がり、風下に長距離運ばれても延焼が起こる。これでは、熱線や対流熱が大きな影響がある以上に長距離にわたり延焼し、核爆発による都市火災の被災地域をはるかに越えることもある。この延焼を予測する簡単な方法はないが、電子計算機による方法は開発中である。

## 大火災

**7.58** ある条件のもとでは、核爆発により起こった個々の火災が統合して、大火災となることがある。その破壊力が大きく特に興味ある大火災の種類は、「火事あらし」とコンフラグレーションである。火事あらしでは、多くの火災が合流して、燃焼地域から立昇る1本の対流性熱気柱を形成し、火災に誘導された強い放射状の風（内側に吹き込む風）が吹く。従って、火災前面は本来固定的であり、外側への延焼は内側へ向う強い風で阻止される。しかし、实际上火事あらしの内部にある可燃物は、最終的には燃えつきてしまう。観測した現象の記述は別として、一般的に受け入れられる火事あらしの定義はいまだにない。その上、火事あらしが起こることが予想される気象・出火点の密度・可燃物の密度等の条件は不明である。第2次世界大戦時ドイツ及び日本に対する空襲の結果起きた大火の経験に基づき、火事あらしが発達する最少要件は次のとおりであると、数名の権威者は考えている。

- (1) 最少限、火災地域1平方フィート当たり8ポンドの可燃物があること。
- (2) 最少限、地域内建物の半数が同時に燃えること。
- (3) 每時8マイル未満の風であること。
- (4) 最少限、火災地域が $\frac{1}{2}$ 平方マイル以上あること。

高層建築物では、可燃物が垂直に分散しており、また構造物の阻止効果のため

火事あらしは発生しない。

7.59 火事あらしと異なり、コンフラグレーションは取巻いている風に誘導されて火災前面が移動する。火災は可燃物が十分あればどんどん拡がる。火事あらしが比較的広い地域に同時に多数の火が燃えている場合にのみ観測されるのに対して、コンフラグレーションは1つの元火からでも進展する。

7.60 火災拡大のもう1つ重要な事柄は、枯葉・枯草・朽木が熱線を受けて第1次発火した後、森の中で大火災に進展することである。このような火災の進展に影響する要素には、木の平均密度及び平均含水量・裸地の割合・地勢・季節及び気象状態等がある。湿度が低く、風が強く、地形がけわしい場合は、森林火災が拡大しやすい。一般に、落葉樹林は、特に葉の繁っている時には、針葉樹林のように急速にかつ激しくは燃えないであろう。青葉と木の幹は熱線に対する遮蔽物として作用し、そこで森の中における発火点の数は、予想されるものより少ない。

## 第4節 日本における焼夷効果

### 焼夷兵器としての核爆弾

7.61 核爆発の焼夷効果は、特別な特徴を示すものではない。火災と爆風に関しては、原理的には核兵器と全く同じ結果を通常の焼夷爆弾及び高性能爆弾を使用して作り出すことができる。例えば、広島でこうむった建物及びその他の構築物に対する火災による被害は、全市にわたり約1,000トンの焼夷爆弾を投下することにより作り出すことができると見積られている。しかし、これがわずかに爆発出力約12.5KTの核兵器1発によるものであり、核兵器は爆風と同様に、火災によっても莫大な破壊力があることがわかる。

7.62 日本における核爆発から、火災による被害は、爆風による被害よりも局部的な地形・気象の影響がずっと大きいという証明が得られた。ある爆風による被害を受けた爆心地からの距離は、広島と長崎のいずれの市においても全く同じであったが、焼夷効果の範囲は全く異なっていた。例えば、広島において火災のた

め激烈に破壊された地域の全面積約4.4平方マイルは、長崎の場合の約4倍であった。大きな理由の1つは、広島に比較して長崎市の都市配置の不規則性であり、爆発点を変更していれば、おそらくもっと大きく破壊できていたであろう。しかしもっと重要な理由は、地形とそれにともなう建物密度の相違である。広島は比較的平坦で建込んでいたが、長崎には爆心地の近くに建物のない丘の部分があった。

### 日本における出火と延焼

**7.63** 爆心地から3,500フィート(0.66マイル)に到るまでの間にある、戦争間どの家庭でも使用した遮光カーテン類・薄い紙及び乾燥した朽木に熱線から火がついたという日本人観察者の明確な証言がある。更に遠方の杉皮屋根も一見自然に燃え上ったという報告もあるが、これは確認されていない。反射・散乱・集光作用による異常に多量の熱線を受けて、全く離れた場所で発火したことがあった(図-7.63)。

**7.64** 広島・長崎の両市で発見された焦げた木材は、先ず実際に着火し、次いで爆風によって炎が消えたものと結論づけられていた。しかし現在では、例外的ないくつかの例を除いて実際には着火しなかった方が確からしいと見られている。熱線を吸収して割れていない木は焦げたが、全般的に着火するほど温度は高くなかった(7.28)。朽木・割木・まき類は燃えつきているのが観察されており、炎は爆風により大きな影響を受けなかった。



図-7.63 木製ポールの先端部は熱線で燃えたと報告されている。  
(爆心地から1.25マイル、 $5 \sim 6 \text{ cal/cm}^2$ の広島の例) 周囲が燃えていないのに注意。この付近の建物で燃えたのは最も近くで360フィートの距離

7.65 日本での核爆弾投下において、熱線が火災の発生にどの程度かかわったかはわかっていない。爆心地から1マイル程度までは、ストーブの転倒・電気的短絡・ガス管の破壊等爆風の直接効果による2次の原因で火災のある部分は出火している可能性がある。工場火災の多数は、炉やボイラーの転倒、又は建物のその上への倒壊によって出火している。

7.66 一旦火がついた後、爆風による破壊が直接火災の拡大に影響する要因がいくつかある。爆風は窓をこわし、防火シャッターを吹き飛ばしたりこわし(図-7.66)、壁や屋根の下ぶきをはぎとり、壁や屋根を倒壊させて多くの建物を火災に

対してもろくする。不燃性（耐火性）建築物では、階段・エレベーター・防火壁の開口部の破壊及び床や隔壁の倒壊によって、火災が建物内部で拡大するのに好条件となる（図-5.23参照）。



図-7.66 建物内の防火シャッターが爆風で吹き飛ばされた。中央のシャッターは恐らく建物を吹き抜けた爆風で吹き飛ばされた。（広島における爆心地から0.57マイル）

7.67 一方、可燃性構造物が倒壊した場合には、建っている時のように急速には燃えなかった。その上、爆風により不燃性飛散物がしばしば覆いかぶさって、可燃物の燃焼を阻害した。従って、広島と長崎において、爆風は全体として火災の拡大を促進したのか阻害したのかは疑問である。

7.68 広島及び長崎には、川や空地のような天然の防火帯と、道路や建物をとりはらった人工の防火帯があったが、それ等は延焼防止にあまり有効でなかった。その理由は、火災がしばしば防火帯の両側から同時に起こり、防火帯がその目的をはたすことができなかつたためである。その上、防火帯・庭・街路のような空地に爆風が可燃物を散乱して延焼を阻止できなかつた。しかし、防火帯が耐火性建築物の焼失を阻止した例も2～3ある。

7.69 日本に対する核攻撃の重要なもう一面は、広地域が一度に爆風で破壊さ

れ、消防組織が完全に麻ひしたことである。消防組織及び器材は米国の基準から見れば貧弱であったことは事実であるが、核爆発後のような状態では、仮にもっと優秀な消防組織があったとしても、もっと活発な消火活動ができたかどうかは疑問である。例えば、広島においては、70%の消防ポンプが家屋の倒壊でつぶされ、80%の人員が行動不能であった。仮りに人員・装備が爆風による損害をまぬがれたとしても、街路が飛散物で閉そくされているため、多くの火災現場には近付けなかつたであろう。以上の理由と、火災に巻き込まれるのではないかという恐怖心のため、長崎では破壊をまぬがれた消防団も、爆心地から6,600フィート（1.25マイル）以内への接近は不可能であった。

**7.70** 火災による破壊を大きくしたもう1つの要素は、広島・長崎両市における水利不足であった。給水所には大きな被害を受けなかつたが、給水配管及び給水本管に大きな被害をこうむり、漏水及び水圧の低下をきたした。地上に出ている水道管の大部分は、建物の倒壊と火災の熱による融解とによって破壊された。埋設してある水道本管は、あるものは折れ、あるものは支えているブリッジの崩壊又はねじれにより破壊した（5.106）。

**7.71** 広島においては、核爆発約20分後、火事あらしに通常ともなう多くの特色を示しながら大火災が発達した。市内の火災地域に向つて全方向から風が吹き込み、爆発約2～3時間後には最大風速が30～40マイル/時に達し、その後風速は落ちて約6時間後には風向はまちまちとなつた。風には断続的な雨がともない、市の中心部は小雨であったが、北及び西へ約3,500～5,000フィート（0.67～0.95マイル）にわたる地域はひどく降つた。この雨は、水分が冷い層に達した時に、火災による微粒子上に凝結したもののように思われる。地上における内側への強い吸い込みが、当初出火した地域外への延焼を制限した決定的要因であった。このことから、広島において燃え尽きた地域の半径は非常に均一であり、爆発直後に燃え出した範囲からそれほど大きくならなかつたという事実を説明することができる。しかし、この地域内にある全ての可燃物は實際上燃えつきてしまった。

**7.72** 長崎においては、明確な火事あらしは起こらなかつたが、コンフラグレー

注:(4) 以下の節は読むことを省略しても差し支えない。

ションの起こった核爆発の約2時間後頃には、丘陵の間を吹いていた南西の風が、35マイル/時へと風速を増した。この風は、可燃物が何もない丘に炎を吹き上げていた。それから約7時間後、風向は東に変わり、風速は10~15マイル/時に落ちた。これ等の風は、疑いもなく風上方向への延焼を制限した。広島では平坦な地形で多くの建物があったのに比較して、長崎では市内を貫通している細長い谷の中にある家屋の数が少なく、火事あらしが起こるには可燃物が不足したのである。

## 第5節 熱線の技術的考察<sup>(4)</sup>

### 火の玉からのエネルギー発散と吸収

7.73 兵器実験の過程で行った分光学的研究により、火の玉は厳密には黒体、即ち完全放射体のような性質を示さないことがわかっている。一般に、長波長(5,500Å以上)の放射線の割合から推定する黒体温度は、短波長のものから推定する温度よりも高い。しかし、熱線の放射特性を解釈するにあたっては、火の玉が黒体の性質を有すると仮定するのがかなり良い近似となる。黒体の放射エネルギーのスペクトル分布は、プランクの放射式によって表面温度に関係づけることができる。 $E_\lambda d\lambda$  を波長  $\lambda$  と  $\lambda + d\lambda$ との間のエネルギー密度、即ち、単位容積当たりのエネルギーとするとき、

$$E_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (7.73.1)$$

となり、ここで  $c$  は光速、  $h$  はプランク量子、  $k$  はボルツマン定数即ち1分子当たりのガス定数、  $T$  は絶対温度である。 $hc/\lambda$  は波長  $\lambda$  の光子エネルギーであることに注意(1.74)。

7.74 プランクの式から、ある波長に対する黒体のエネルギー放射率(放射出力) $J_\lambda$ を、ある特定の温度について波長の関数として求めることができる。なぜならば、  $J_\lambda$  を単位面積( $cm^2$ )、単位時間(sec)及び単位波長(A)当たりのエネルギー(Erg) 単位で表わすと、  $J_\lambda$  と  $E_\lambda$  との関係は次のとおりである。

$$J_\lambda = \frac{C}{4} E_\lambda \quad (7.74.1)$$

100,000,000 ( $10^8$ ) °K～2,000 °Kの間の温度範囲について、上記の計算をした結果は図-7.74のとおり。曲線の下の面積に相当する全放射出力は、温度降下とともに大きく減少する。

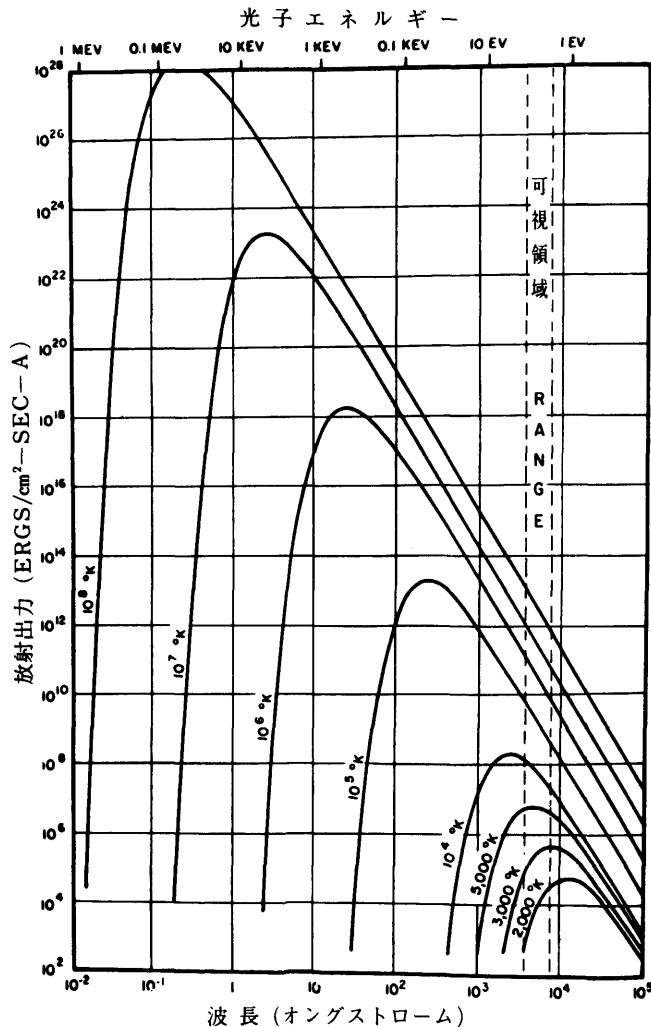


図-7.74 各種温度における黒体の放射出力（波長の関数としての）

7.75 図-7.44の重要な特色は、温度とともに曲線の位置が変わること、換言すれば、放射エネルギーのスペクトルは温度とともに変わることである。高温においては短波長の放射が主体であるが、低温においては長波長の放射が主体となる。例えば、火の玉形成以前の爆発中の核兵器では、その温度は絶対温度数千万度である。そこで、大部分の(第1次)熱線は、波長が0.1~100Å、即ち120~0.12KeVであり、ほぼ軟X線の領域に相当する(図-1.74)。

これが、先に核爆発による第1次熱線は、ほぼX線であると述べた根拠である。第1次熱線は周囲の空気に吸収されて火の玉を形成し、その火の玉から現在関心を置いている熱線が、紫外線・可視光線・赤外線のスペクトル領域で放射される。熱X線を吸収した火の玉の大きさは、やがて述べるように周辺の空気密度により決定される。

7.76 地表面において受ける熱線は、火の玉から出るものとは少し違うことを思い出してほしい。その理由は、波長の短い熱線、即ち紫外線は、爆発点から地表面までの間の大気によって、熱線の他の部分よりも吸収されやすいからである。核爆発から遠く離れて受ける熱線は、紫外線等の短波長のものが吸収・散乱されるにもかかわらず、約6,000~7,000°Kの温度における黒体の特性をよく示す。仮りに爆発が起高空で起こっても、密度の低い火の玉から出る熱線は、地面に到達するまでに密度の高い大気中を通過しなければならない。従ってこの場合に地上で受ける有効な熱線も、長波長のものからなる。

7.77 (7.74.1) 式を波長について微分し、その結果を0と置くことによって、放射出力が最大となるものに相当する波長 $\lambda_m$ が、黒体温度の関数として求めることができる。そこで、

$$\lambda_m = \frac{C}{T} \quad (7.77.1)$$

となり、ここでCは定数  $2.90 \times 10^7 \text{ A} \times {}^\circ\text{K}$  である。これは、ウイーンの変位則として知られている。

7.78 黒体からの放射出力分布の最大が可視スペクトル即ち3,850Åにまで落ちる温度は、(7.77.1)式から約7,500°Kである。これは、熱線放射率が極小になった

後、即ち、第2放射パルスの間（図-2.39）に火の玉の表面温度が最高になる時に非常に近い時期に起こる。全般的に見かけ上の表面温度は8,000°Kを越えず、また平均温度はかなり低いので、第2熱線パルスから放射される熱線は紫外線が少量混った可視光線及び赤外線であることは明白である。この段階においては火の玉は黒体の性質から大きくはずれるが、実際の実験によつても事実が確認されている。

7.79 約0.5~15KeVのエネルギーを持つX線光子の海面密度の冷い空気中における平均自由行程（2.113）は、近似的に次の式で表わされる。

$$\text{平均自由行程} \approx \frac{E^3}{5} \text{ cm} \quad (7.79.1)$$

ここでEは、KeV単位で表わした光子のエネルギーである。核爆発による熱X線が空气中で吸収される距離の目安をつけるために、計算に便利なよう端数のない温度10<sup>7</sup>°Kを使用する。（7.77.1）式から、この温度において黒体からの熱輻射放射率が最大となる波長は2.9<sup>o</sup>Aである。（1.74.2）式によるとこれは4.3KeVの光子エネルギーに相当し、（7.79.1）式から、標準空気内におけるこの光子の平均自由行程は約15cmである。1平均自由行程の間に、熱線エネルギーは1/e、即ち約1/2.7に減少する。そこで、2.3平均自由行程の半径の内側で90%のエネルギーを失う。従つて、4.3KeVの熱線は、海面密度の大気中で約35cm即ち1フィートよりやや大きい距離でほとんど吸収されることがわかる。

7.80 図-7.74から明らかなように、核爆発による第1次熱線の波長は広範囲にわたる。しかし、当初の火の玉の概略の大きさを求めるために、黒体からの放射出力が最大となる波長（又はエネルギー）をその代表値としてとらえる。そこで前項の結果から、核爆発による熱X線は、標準密度の空気約1フィートによりほぼ完全に吸収される。爆発点付近の空気中の酸素と窒素は多量にイオン化しており、イオンは中性分子のようには効果的に熱X線を吸収しない。しかしながら、海面密度と大差ない密度の大気中における核爆発においては、第1次熱線を構成しているX線の大部分は、爆発点から2~3フィート以内で吸収される。空中爆発における最初の火の玉はこのようにしてできる。

**7.81** 高度の増加にともない、空気密度は10マイル毎に約 $\frac{1}{10}$ に減少する（10.124 参照）。そこで例えば155,000フィート（約30マイル）では、空気密度は海面密度の約 $10^{-3}$ である。光子の平均自由行程は空気密度と反対に増加し、高度約30マイルの核爆発においては、火の玉そのものであるX線により加熱された空気の層は、数千フィートの範囲に及ぶ。低密度であるにもかかわらず、この大容積中にある加熱される空気の質量は、低空爆発にともなう火の玉の中にある空気の質量よりもずっと多く、そのため空気温度は低い。

### 火の玉による熱出力及び熱エネルギー

**7.82** ステファン・ボルツマンの法則によると、黒体がある半球の全方向に対し、毎秒 $1 \text{ cm}^2$  当り放射する全エネルギーの量（全波長にわたっての）Jは、絶対温度Tと次の関係にある。

$$J = \sigma T^4 \quad (7.82.1)$$

ここで、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数である。Jの値は (7.74.1) 式を 0 から無限大五全波長にわたり積分することによっても求めることができる。

そこで、

$$\begin{aligned} \sigma &= 2\pi^5 k^4 / 15 h^3 c^2 \\ &= 5.67 \times 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{deg}^{-4} \\ &= 1.36 \times 10^{-12} \text{ Cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{deg}^{-4} \end{aligned}$$

わかった $\sigma$ を使用して、黒体の性質を有するとして、火の玉から出る全放射エネルギーの強さをいかなる温度に対しても計算することができる。

**7.83** 上記の J の定義によると、火の玉から出る全放射エネルギーの放射速度は、(7.82.1) 式に面積を掛けて求めることになる。火の玉の半径を R とすると球面積は $4\pi R^2$ となり、全熱エネルギーの放射速度（又は全放射出力）は、 $\sigma T^4 \times 4\pi R^2$ である。この値を P で現わすと、次のようになる。

$$P = 4\pi \sigma T^4 R^2 = 1.71 \times 10^{-11} T^4 R^2 \text{ Cal/sec}$$

ここで、T は絶対温度単位、R は cm 単位である。半径 R をフィート単位にすると、

$$P = 1.59 \times 10^{-8} T^4 R^2 \text{ Cal/sec} \quad (7.83.1)$$

**7.84** 火の玉の見かけ上の大きさと温度の時間的な変化は、流体力学的要因と熱放射的要因の複雑な相互作用により支配される。しかしながら、火の玉の熱出力は理論式を実験値で修正したものにもとづき、時間の関数として計算することができる。結果は便宜上、換算時間  $t/t_{max}$  に対する換算出力  $P/P_{max}$  として便宜的に表わされている。ここで、 $P$  は爆発  $t$  時間後における熱出力、 $P_{max}$  は第2極大温度  $t_{max}$  (2.125) における熱出力の最大値である。図-7.84にある結果を示す（左側のスケール）は爆発出力に関係なく一般的に適用できる。爆発出力と爆発高度の変化は出力パルスの形に影響するが、図-7.84の値は100,000フィート以下の大部分の空中爆発に対して相当正確である。換算時間軸の 0 は第1次極大となる時間であるが、実用的にはこれを爆発時間としてとらえてよい。

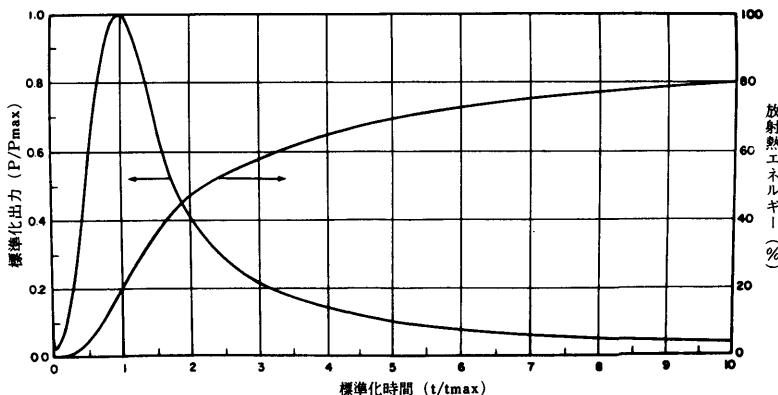


図-7.84 爆発コード10万フィート以下の空中爆発の熱パルスについて放出される標準化された火の玉出力と熱エネルギーの割合の時間に対する割合

### 空中爆発による熱エネルギー

**7.85** ある爆発出力について、熱出力——時間曲線を作るためには、該当する  $P_{max}$  と  $t_{max}$  の値を知る必要がある。理論的には、これ等の値は空気密度により左右されるはずであるが、実験によると高度15,000フィート以下における爆発については、ほとんど左右されないことがわかった。即ち、この高度範囲では、 $P_{max}$

と  $t_{max}$  は、近似的に爆発出力のみに関係し、爆発出力を  $W$  KT とすると、次のとおり。

$$P_{max} \approx 3.18 W^{0.56} \text{ KT/sec}$$

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

爆発高度 15,000 フィート以上では、データはばらばらになる。理論的には、次のような関係式となる。

$$P_{max} = \frac{3.56 W^{0.59}}{[\rho_{(h)}/\rho_o]^{0.45}} \text{ KT/sec}$$

$$t_{max} = 0.038 W^{0.44} [\rho_{(h)}/\rho_o]^{0.36} \text{ sec}$$

ここで、 $\rho_{(h)}$  は爆発高度付近の空気密度を、 $\rho_o$  は海面における標準空気密度 ( $1.225 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$  とする) を表わす。 $\rho_{(h)}/\rho_o$  の値は、高度別に表-7.85に記載してある。前記の式を用いると、15,000 フィートにおいて不連続となるが、その付近においては両方の式で計算して値を求め、攻撃か防御かによって望ましい方の値を使用する必要がある。地表爆発においては (2.127 脚注)、爆風のエネルギーが地表面で反射して火の玉の中に入るため (3.34)、火の玉は爆発出力 2 倍の空中爆発に近い状態で発達する。従って、 $t_{max}$  は同一爆発出力の空中爆発より大きいことが予想される。

図-7.84 の曲線は、空中爆発の熱線パルスにおける、換算時間  $t/t_{max}$  に関する火の玉の換算出力  $P/P_{max}$  (左側のスケール) 及び全放出熱エネルギーに対するパーセント  $E/E_{tot}$  (右側のスケール) の変化を示したものである。

目盛：図-7.84 のデータを  $W$  KT の核爆発に適用する際、15,000 フィート以下の爆発に対しては、次の式を使用する。

$$P_{max} \approx 3.18 W^{0.56} \text{ KT/sec}$$

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

15,000 フィート以上の爆発に対しては、次の式を使用する。

$$P_{max} = \frac{3.56 W^{0.59}}{[\rho_{(h)}/\rho_o]^{0.45}} \text{ KT/sec}$$

$$t_{max} = 0.038 W^{0.44} [\rho_{(h)}/\rho_o]^{0.36} \text{ sec}$$

すべての場合に、 $E_{tot} = f \cdot W$ 、である。

これらの式の中で、 $t_{max}$ は第2熱線パルス中で極大温度となる時の爆発からの時間、 $P_{max}$ は火の玉からの熱線の極大放射率（ $t_{max}$ 時間の時）、 $E_{tot}$ は火の玉から放射される全熱エネルギー、 $f$ は熱分率（表-7.88）、 $\rho_{(h)}/\rho_0$ は空気の海面密度に対する爆発高度における密度の比である（表-7.85）。

例題：爆発高度5,000フィートの500KTの爆発について次のもの求めよ。

- (a) 爆発1秒後における熱エネルギーの放射速度
- (b) 爆発1秒後までに放射される熱エネルギーの総量

解：爆発高度が15,000フィート以下であるので、

$$t_{max} = 0.0417 \times (500)^{0.44} = 0.64 \text{ (sec)}$$

爆発1秒後の標準化時間は、

$$\frac{t}{t_{max}} = \frac{1}{0.64} = 1.56$$

(a) 図-7.84から、この換算時間における $P/P_{max}$ の値は0.59であり、

$$P_{max} = 3.18 \times (500)^{0.56} = 103 \text{ (KT/sec)}$$

$$P = 0.59 \times 103 = 60.8 \text{ (KT/sec)} = 60.8 \times 10^{12} \text{ (Cal/sec)}$$

(b) 爆発高度5,000フィート、爆発出力500KTに対する $f$ （＝ $E_{tot}/W$ ）は、表-7.88から0.35である。そこで、

$$E_{tot} = 500 \times 0.35 = 175 \text{ KT}$$

換算時間1.56における $E/E_{tot}$ の値は、図-7.84から40%即ち0.40、

$$E = 0.40 \times 175 = 70 \text{ (KT)} = 70 \times 10^{12} \text{ (Cal)}$$

信頼性：図-7.84及び表-7.88を使用したデータは、15,000フィート以下では精度が±25%以内であり、15,000～100,000フィートの間では±50%以内である。100,000フィート以上の爆発については、7.89以後で述べる。風のエネルギーが地表面で反射して火の玉の中に入るため（3.34）火の玉は爆発出力2倍の空中爆発に近い状態で発達する。従って $t_{max}$ は同一爆発出力の空中爆発より大きいことが予想される。

表-7.85 大気の比重

| 高 度<br>(フィート) | 比 重<br>$p(h)/p$ | 高 度<br>(フィート) | 比 重<br>$p(h)/p$ |
|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 15,000        | 0.63            | 60,000        | 0.095           |
| 20,000        | 0.53            | 65,000        | 0.075           |
| 25,000        | 0.45            | 70,000        | 0.059           |
| 30,000        | 0.37            | 75,000        | 0.046           |
| 35,000        | 0.31            | 80,000        | 0.036           |
| 40,000        | 0.24            | 85,000        | 0.028           |
| 45,000        | 0.19            | 90,000        | 0.022           |
| 50,000        | 0.15            | 95,000        | 0.017           |
| 55,000        | 0.12            | 100,000       | 0.014           |

7.86 図-7.84の熱出力曲線（左側）は、特別に興味をそそるような形をしている。予想できるように、火の玉の熱出力（放射エネルギーの放射速度）は、第2熱線パルスの中で温度が極大値に昇ってゆくにつれて増大し極大値になる。しかしながら、熱出力はほぼ $T^4$ に比例するので、温度に比べて急激に増減する。このことで $P/P_{max}$ 曲線が極大値に向って急激に上昇し、続いて火の玉が終末期に近づくに従い、ゆっくりと落ちていくことが説明できる。空中爆発において、火の玉からある時間までに放射された熱エネルギーの量Eは、その時間までの $t/t_{max}$ — $P/P_{max}$ 曲線の下の部分の面積から求めることができる。その結果は、 $t/t_{max}$ に対する $E/E_{tot}$ （%）として現わされ、図-7.84に第2曲線（右側のスケール）として表わされている。ここで $E_{tot}$ は火の玉から放射される全熱エネルギーである。 $10t_{max}$ に相当する時間までに、約80%の熱エネルギーが放射されてしまうことがわかるが、そこでこの時間を、空中爆発における有効持続時間の概略の限界としてとらえてもよい。 $t_{max}$ は爆発エネルギーとともに増加するので、熱線パルスの長さも爆発エネルギーとともに増加する。

7.87 热線パルスの長さが爆発出力とともに増加するという事実は、人員が热線に対して回避行動をとる可能性を生み出すことも意味する。高出力では热線パルス長が大きくなるので、低出力に対するよりも高出力に対する方が回避行動の効果は大きくなる。図-7.87には、違った方法でその状況を表わしてある。即ち、

4個の異なった爆発出力について  $t/t_{max}$  ではなく実時間の関数として熱エネルギーの放射を表わしている。このデータは、図-7.84の曲線に、各出力について  $t_{max}$  の計算値を入れて誘導したものである。低出力においては、熱線は非常に短時間に放射されて回避行動は不可能であるが、高出力においては爆発後数分の1秒間に回避行動をとることができれば、大部分の熱線の被ばくを避けることができる。勿論、高出力の爆発からは、この短時間の間にさえも非常に多量のエネルギーが放射されていることを覚えておかなければならぬ。

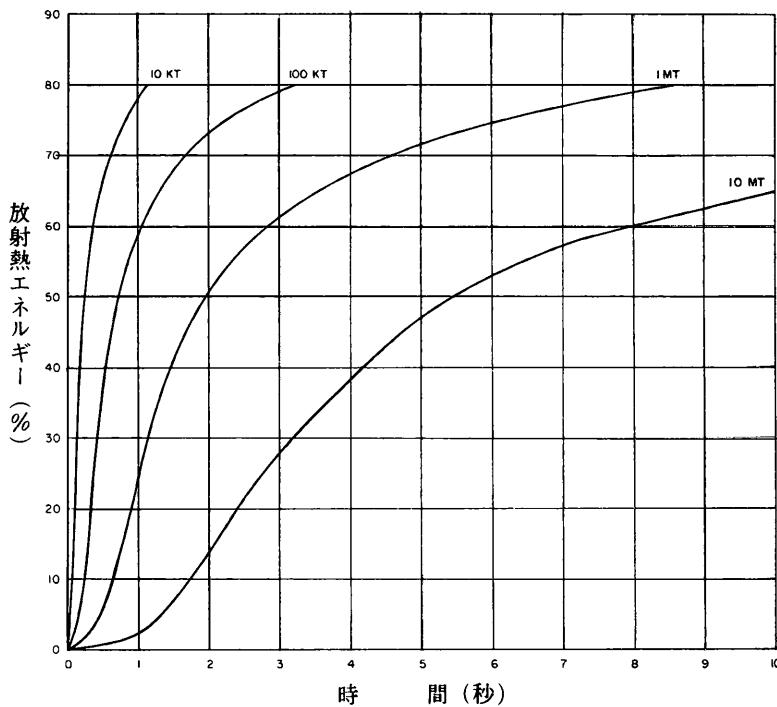


図-7.87 各種出力の空中爆発について時間を変数とした放射線エネルギーの割合

7.88 爆発エネルギーの中、熱線の割合即ち  $E_{tot}/W$  は熱分率とよばれ、 $f$  の記号で表わされる。表-7.88には、100,000フィート（19マイル）までの高度における1 KT～10 MTの間の爆発出力の空中爆発に対する  $f$  の推定値を記載している。

爆発高度15,000フィートまでのデータは主として実験結果から得た。それより高高度のものは、計算によって求め、それは実験結果によって各種方向から検討した。爆発出力1 KT～1 MT、爆発高度50,000フィート(9.5マイル)までに対しでは、かなり信頼性があると考えられているが、それ以外においては信頼性が落ちる。爆発高度100,000フィート以上のfの値は、7.90に記載されている(7.104も参照)。

表-7.88 各種高度における爆発出力に応じた熱分率f

| 爆発高度<br>(キロフィート) | 熱 分 率 f    |      |      |       |        |
|------------------|------------|------|------|-------|--------|
|                  | 総 出 力 (KT) |      |      |       |        |
|                  | 1          | 10   | 100  | 1,000 | 10,000 |
| Up to 15         | 0.35       | 0.35 | 0.35 | 0.35  | 0.35   |
| 20               | 0.35       | 0.36 | 0.39 | 0.41  | 0.43   |
| 30               | 0.35       | 0.36 | 0.39 | 0.41  | 0.43   |
| 40               | 0.35       | 0.36 | 0.38 | 0.40  | 0.42   |
| 50               | 0.35       | 0.36 | 0.38 | 0.40  | 0.42   |
| 60               | 0.35       | 0.37 | 0.38 | 0.40  | 0.42   |
| 70               | 0.36       | 0.37 | 0.39 | 0.40  | 0.42   |
| 80               | 0.37       | 0.38 | 0.39 | 0.41  | 0.43   |
| 90               | 0.38       | 0.39 | 0.40 | 0.41  | 0.43   |
| 100              | 0.40       | 0.40 | 0.41 | 0.42  | 0.45   |

### 高空爆発における熱線

7.89 前述の結果は、空気密度がまだかなり大きい爆発高度約100,000フィート(19マイル)以下の爆発に適用できる。更に上空では、第2章で述べたとおり、火の玉現象は変化し、形・長さ・熱分率のような熱線パルスの特性も変化する。高度が増加するに従い、第1熱線パルスの相対的な長さは、即ち温度が極小となるまで(2.39、2.125)、増加し、温度の極小となるのがはっきりしなくなる傾向がある。高度約100,000フィートまではこの変化は小さく、第2次熱線パルスの変化も小さい。この高度までは、正規化したプロット(図-7.84)で十分満足できる。しかし、100,000～130,000フィート(25マイル)の間に、パルスの形は急激に変化する。低空爆発で見られた第1極小値は消火し、基本的には全熱線が單一

パルスとして放射される(2.132)。熱線放射は極めて短時間のうちに最高に達し、その後はじめは早く、やがてゆっくりと減少してゆく。MT級爆発の熱線パルスの持続時間は、爆発高度100,000フィート以下では2~3秒であるのに対し、250,000フィート(約47マイル)では1秒以下である(図-7.87参照)。高空におけるパルス長の爆発出力に対する関係式は、非常に複雑で各種要因に左右される。しかし、熱線パルスの持続時間は、多分爆発出力には大きく左右されないであろう。約270,000フィート(51マイル)以上の高度においては、照射範囲の拡大と低温とのため、パルス長は増加する(7.91)。

7.90 高空においては空気が薄いので、衝撃波は非常に形成され難く、そのため、低空では爆風の流体力学的エネルギーに変換されていたエネルギーも熱エネルギーとして放射することができる。その上、空気が薄いために爆発による第1次熱線(X線)は低空域よりもずっと遠方まで到達する。この熱放射のあるものは非常に遠くまで到達し、火の玉内のエネルギーに何も関与しない。約100,000~160,000フィート(30マイル)の間では、第1の要因が主体となり、爆風の占めるエネルギーの割合は減少し、その結果熱エネルギーが増大する。熱分率 $f$ は、100,000フィートでは0.40~0.45であるのに比べ(表-7.88)、この高度層においては約0.6である。しかし、160,000フィート以上では、第2の要因即ち熱X線の散逸が逐次重要となり、熱分率は200,000フィート(38マイル)で約0.25にまで減少し、そのまま約260,000フィート(49マイル)まで続く。更にその上空においては、火の玉の性質(2.135)が変化し、爆発高度の増加とともに、急速に熱分率が減少する。

7.91 約270,000フィート以上の爆発高度においては、下に向って放射された第1次X線のみが吸収され、吸収されたエネルギーによって第2章に述べた白熱X線のパンケーキを形成する。そしてこの加熱された部分からは、数秒間にわたりそのエネルギーを更に長波長で放射する。そのパンケーキの高さ及び大きさは、ある程度爆発出力に左右されるが、2.134に述べたように、妥当な平均値としては、厚さ30,000フィート、高度27,0000フィート、半径は(爆発高度—27,0000)フィートである。再放射の領域の高度と厚さは、270,000フィート以上では基本的には

爆発高度に無関係であるが、その平均的な半径は爆発高度とともに増加する。従ってこの領域の形は、高度約270,000フィートを中心をもつ、厚味のある円盤（円錐体）に近づく。

**7.92** 爆発によるX線エネルギーの $\frac{1}{4}$ 以下のものが再放射領域の低密度の空気中に吸収され、爆発高度上昇にともない減少してゆく少量部分のみが、第2次放射として再放射される。その結果、地表面で被害をもたらす熱線としては、兵器のエネルギーのわずかしか放射されない。事実、高度330,000フィート（63マイル）以上における爆発では、MT級の核爆発による熱線さえも、皮膚の火傷や火災に関するかぎり基本的には効果がない。しかし、X線のパンケーキとは別に初期の飛散物（2.135）は非常に高温であり、非常に短いパルスを放射して爆発を直視している者の目をいためる（12.79以下）。

## 第6節 受熱密度と距離の関係

### 空中爆発

**7.93** ある出力の空中爆発からの距離に対する目標の受熱密度の依存関係の計算は、次の手順による（7.35）。本章の始めに述べたとおり、図-7.42・表-7.35及び表-7.40のデータを組み合わせると、各種熱線効果が予想される範囲を見積ることができる。

**7.94** 大気による減衰がないとすれば、爆発点からの距離Dにおける熱放射エネルギー $E_{tot}$ は、球面 $4\pi D^2$ に均一に拡がっていると考えてよい。放射している火の玉を点放射源として扱うと、球面の単位面積当たりに受けるエネルギーは、 $E_{tot}/4\pi D^2$ であろう。減衰が空中爆発のように均一な大気中の吸収のみに起因するような場合は、この値に $e^{-KD}$ を掛けることになるであろう。ここでKは、全波長にわたっての平均吸収係数である。従って、爆発点からの距離Dにおける受熱密度即ち伝播方向に対し垂直な単位面積当たりに受けるエネルギーをQとすると、次のようになる。

注:(5) 散乱された熱線は永久的な盲目の原因とはならない。そこで有効な受熱量の効果算定を決めるには式(7.94.1)を使用すべきである。即ちKは80kmの視程で $0.03\text{km}^{-1}$ 、40kmで $0.1\text{km}^{-1}$ 、20kmで $0.2\text{km}^{-1}$ とする。しかし閃光盲目や輝光のためのげん惑(わく)を起こさせる。

$$Q = \frac{E_{tot}}{4\pi D^2} \cdot e^{-KD} \quad (7.94.1)$$

**7.95** 吸収の他に熱線の散乱が起こる場合は、吸収係数Kは距離及びその他の要因により変化する。そのため、(7.94.1)式にある簡単な指數の吸収係数は不適当である。もっと実用的な式（実験式）として、次のようなものを考える。

$$Q = \frac{E_{tot} \cdot \tau}{4\pi D^2} \quad (7.95.1)$$

ここで、伝播係数 $\tau$ 、即ち伝播する熱線（直接・散乱の両方）の割合は、視度（散乱）、吸収及び距離の複雑な関数である。<sup>(5)</sup>

**7.96**  $E_{tot} = f W$ 、であるので、爆発出力Wの空中爆発による受熱密度の(7.95.1)は、次のようになる。

$$Q = \frac{f \cdot W \cdot \tau}{4\pi D^2} \quad (7.96.1)$$

1KTのTNTは、 $10^{12}\text{Cal}$ に等しいという事実から、空中爆発の(7.96.1)式は、次のようになる。

$$Q (\text{Cal/cm}^2) = \frac{10^{12} f W \tau}{4\pi D^2} \quad (7.96.2)$$

ここで、Dはcm単位、WはKT単位である。爆発点から目標までの距離、即ち直距離D、がキロフィート又はマイルで表わされている場合、(7.96.2)式は概略次のように換算できる。

Dがキロフィート単位、

$$Q (\text{Cal/cm}^2) \approx \frac{85.6 f W \tau}{D^2} \quad (7.96.3)$$

Dがマイル単位、

$$Q (\text{Cal/cm}^2) \approx \frac{3.07 f W \tau}{D^2} \quad (7.96.4)$$

**7.97** QとWは核実験において計測可能であり、爆発点からの距離Dはわかるので、7.96の式から $f \cdot \tau$ の積の大きさがわかる。ここで $f$ と $\tau$ とを別個に求めるためには、一方を他方と独立的に決定しなければならない。ここで使う方法は、7.88で述べたように、観測で点検しながら、計算によって異なった条件のもとでの $f$ の値を求めるものである。 $\tau$ の値は、多数の実験で求めた $f \cdot \tau$ の測定から導く。

**7.98** ある大気状態における伝播係数 $\tau$ は、散乱熱線がある照射物体に到達でき

る立体角によって決定される。この場合、目標がほぼ平面であると仮定すれば照射源から直接受ける熱線の他、散乱熱線を全方向から受ける。雲がなく視度12マイルの気象状態における、伝播係数と爆発高度及び爆心地から地上目標までとの距離との関係を図-7.98に記載している。実際の都市内での視度は、しばしば12マイルより小さく、図-7.98の値はきびしい側にとっている。

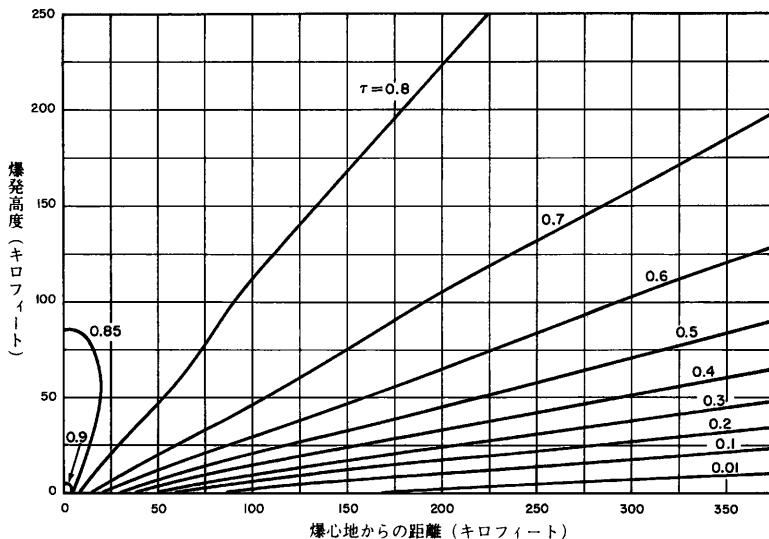


図-7.98 典型的な晴れた日（視度12マイル）の地上目標に対する伝播係数  $\tau$

7.99 図-7.98にある伝播係数は、(7.96.4)式と表-7.88にある熱分率と一緒に、図-7.42の曲線を作る基礎データを求めるのに使用した。爆発高度を  $H$ 、ある地点の爆心地からの距離を  $d$  とすると、(7.96.4)式の直距離は  $D = (d^2 + H^2)^{1/2}$  である。WをKT単位として、爆発高度  $200 W^{0.4}$  を計算に使用するが、図-7.42の結果は、約150,000フィートまでの空中爆発に対して相当正確である。

7.100 異常な状態、特に高地にある都市では、視度が海面より大きく伝播係数が図-7.98の値よりも大きくなることがある。曲線から見ると、熱線減衰の大部分は地上2,000～3,000フィート以内で起こっていることがわかり、そのため高地における清澄な空气中ではあまり減衰がない。約150,000フィート(28マイル)以

上の爆発では、伝播係数は高度とともにゆっくりと変化する。実験結果によると、伝播係数を1.5倍すると、爆発点上空の雲からの反射の影響を補正することができる。積雪地に対しても、同様にして補正することができる。雲と雪の両方からの反射がある場合には、補正係数は $1.5 \times 1.5 = 2.25$ となる。

## 地表爆発

7.101 地表爆発の受熱密度は、同一爆発出力の空中爆発による同一距離における受熱密度に比較して小さい。この相違は、7.20に述べたように、爆発により水蒸気やほこりが舞い上がり、中間にある空気の地表面近くの層の伝播係数が減少したことが部分的にはその理由である。その上、地表面近くの通常の大気は上空に比べてあまり伝播しない。地表爆発に対する受熱密度を決定する際に7.96の式を使用するためには、現実の大気状態に対する図-7.98にある通常の伝播係数とともに、「有効熱分率」の考え方をとる。実験結果によると、接地爆発の有効熱分率は0.18でかなり良くあう。その他の地表爆発の熱分率の値は、表-7.101に記載しており、その値は接地爆発に対する熱分率を0.18とし、その値と表-7.88にある空中爆発の熱分率の値との間を補整したものである。

## 超高空爆発

7.102 地表面における超高空爆発からの熱線照射の計算においては、約270,000フィート付近の高度で起こる火の玉の性質の変化（7.91）のために、2つの高度域を考えなければならない。爆発高度約160,000～200,000フィート（30～38マイル）では、地上に被害を及ぼすことのできる熱線は、約60%から25%に、即ち $f = 0.60$ から $f = 0.25$ に急激に落ちる。

200,000フィート以上約260,000フィート（49マイル）までは、爆発高度が大きくなっても一定で、約0.25である。後者の高度範囲では、ほぼ球形の火の玉が形成されるので、(7.96.3) 式は次のようになる。

$$Q = \frac{21.4 W \tau}{D^2} \quad (7.102.1)$$

ここで、Dはキロフィート単位の直距離、WはKT単位の爆発出力である。

160,000フィート～200,000フィートの爆発に対しては、各高度に応じて熱分率

表-7.101 地表爆発に対する有効熱分率

| 爆発高度<br>(フィート) | 熱 分 率       |      |      |       |        |
|----------------|-------------|------|------|-------|--------|
|                | 総 出 力 (K T) |      |      |       |        |
|                | 1           | 10   | 100  | 1,000 | 10,000 |
| 20             | 0.19        | 0.19 | *    | *     | *      |
| 40             | 0.21        | 0.21 | *    | *     | *      |
| 70             | 0.23        | 0.22 | 0.19 | *     | *      |
| 100            | 0.26        | 0.25 | 0.20 | *     | *      |
| 200            | 0.35        | 0.33 | 0.21 | 0.19  | *      |
| 400            | **          | **   | 0.25 | 0.21  | 0.19   |
| 700            | **          | **   | 0.28 | 0.24  | 0.21   |
| 1,000          | **          | **   | 0.34 | 0.26  | 0.22   |
| 2,000          | **          | **   | **   | 0.34  | 0.26   |
| 4,000          | **          | **   | **   | **    | 0.33   |
| 7,000          | **          | **   | **   | **    | 0.35   |

\* 接地爆発として扱う  $f = 0.18$ \*\* 空中爆発 第7.88表の  $f$  の値を参照

は比例配分をして求めてよい。しかし、高空爆発現象の不確実性を考慮すると、使用目的によって安全なように、大きくとる場合には0.60、小さくとる場合には0.25をとるのが望ましい。

**7.103** 爆発高度約270,000フィート以上では、熱線は平均高度約270,000フィートの厚味のあるX線パンケーキから放射され、基本的には実際の爆発高度には無関係である(7.91)。種々の距離における受熱密度を計算する際に7.96の式を使用するためには、円盤状の放射領域を次のように定義した等価点放射源に置き換えて近似的に求める。爆心地から、Qを計算する目標の位置までの距離が、爆発高度Hより小さい場合は、放射源の位置を高度270,000フィートの中央値〔訳注： $\frac{1}{2}(H - 270,000)$  フィート〕を半径とする円周上の最も近い位置にあるとみなす。これは図-7.103にS点として示してある。ここでX点にある目標の直距離は、概略次のとおりである。

$$D(\text{キロフィート}) \approx [(270)^2 + \{\frac{1}{2}(H - 270) - d\}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7.103.1)$$

ここで、d及びHはキロフィート単位である。この式はdが $\frac{1}{2}(H - 270)$ より

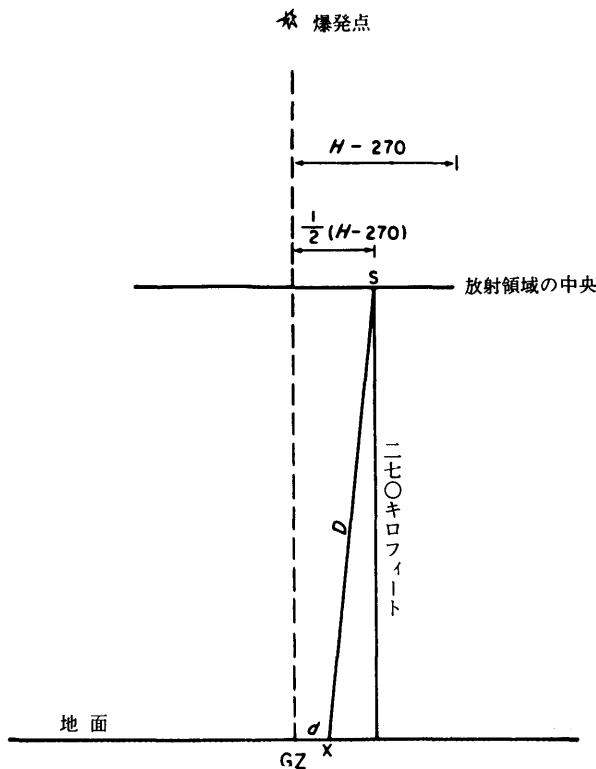


図-7.103 爆発高度が爆心地からの距離Xより大きい場合の中央軸上の等価点熱源

大きくても通用する。この時 { } の中の値は負となるが、2乗すると正となる。  
爆心地に対する直距離  $D_o$  は、(7.103.1) 式の  $d$  を 0 に置けば求めることができる。

$$D_o(\text{キロフィート}) \approx \{(270)^2 + \frac{1}{4}(270 - H)^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$d$  が爆発高度より大きい場合には、等価点放射源の位置は近似的に放射しているパンケーキの中心で高度 270,000 フィートと考える。そこで、

$$D(\text{キロフィート}) \approx \{(270)^2 + d^2\}^{\frac{1}{2}}$$

7.104 現在考察中の爆発高度では、全エネルギーの 0.8 が X 線エネルギーとして放射され、この X 線エネルギーの 0.25 が放射している円盤層に吸収されるとみなして

注:(6) この計算は、10秒以内に反射される吸収X線エネルギーの分布で、地上での対策を推測するのに用いることができる。

いる。従って全エネルギーの $0.8 \times 0.25 = 0.2$ が吸収されている。従って、受熱密度を計算するにあたっては、7.96の式の中で爆発出力Wを $0.2W$ に置き換える。その上、熱分率の等価量なるものがあり、再放射される吸収エネルギーの割合と定義され、「熱効率」 $\epsilon$ とよばれている。

そこで、例えば(7.96.3)式は次のようになる。

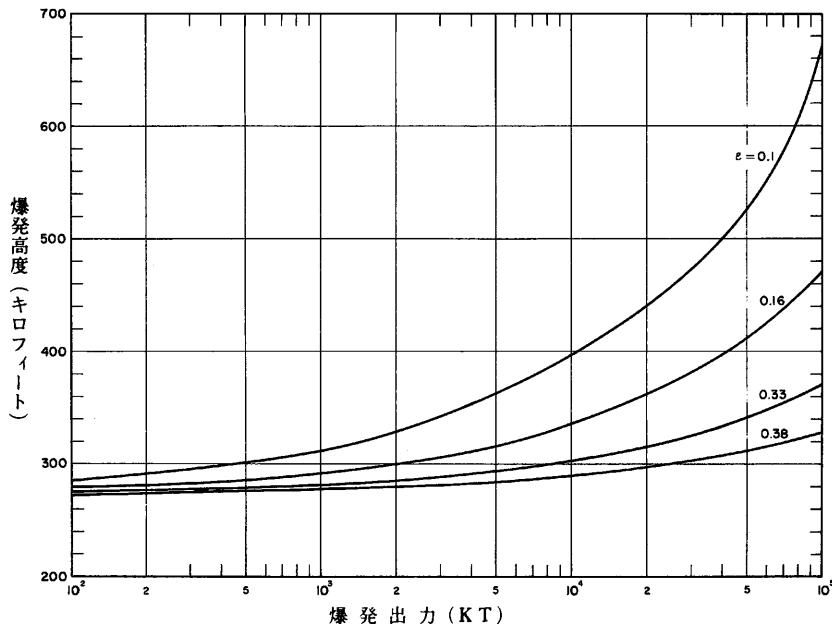


図-7.104 高空爆発による吸収X線エネルギーの再放射率

$$Q (\text{Cal/cm}^2) = \frac{17.1 \epsilon W \tau}{D^2}$$

ここでDは、前項の要領にもとづき決定したキロフィート単位の直距離である。爆発出力及び爆発出力の関数として図-7.104に与えられている $\epsilon$ の値は、理論的な計算から求めたものである。<sup>(6)</sup> 伝播係数は図-7.98からも推定できるが、高空においては一定とおいても大した誤差はない。

7.105 以上のことから、爆心地からの距離dの地上のある点における概略の受熱密度Qは、基本的には全高度Hにわたり7.96の式を使って計算することができる。dとHがわかっているれば、相当する直距離を決定することができる。表一

7.88 表-7.101及び図-7.104を使って熱分率と熱効率とを求めることができ、既知の  $d$  と  $H$  とを使って図-7.98から伝播係数を見積ることができる。しかし、逆に計算をして、ある  $Q$  の値を受ける地上目標への直距離（又は、ある爆発高度に対しての爆心地からの距離）を求めるとしてよう。 $\tau$  は直距離か又は、爆心地からの距離がわかっている場合でなければ見積ることができないので、状況は非常に困難である。1つの方法として、数種の爆発高度について図-7.42のような図を準備し、その他の爆発高度については補整して求めるというのが考えられる。もう1つ考えられるのは、例えば  $\tau = 1$  のように  $\tau$  を仮定して先ず  $D$  を求めという相互決定法である。このようにして先ず求めた  $D$  の値と爆発高度から、図-7.98を使用して、より正確な  $\tau$  を求めることができる。この  $\tau$  を使用してもっと正確な  $D$  を求め、これらを収れんさせる。

## 参 照 文 献

- \*BETHE, H. A., *et al.*, "Blast Wave," University of California, Los Alamos Scientific Laboratory, March 1958, LA-2000.
- BRODE, H. L., "Review of Nuclear Weapons Effects," *Ann. Rev. Nuclear Sci.*, 18, 153(1968).
- CHANDLER, C. C., *et al.*, "Prediction of Fire Spread Following Nuclear Explosions," Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California, 1963, U.S. Forest Service Paper PSW-5.
- GIBBONS, M. G., "Transmissivity of the Atmosphere for Thermal Radiation from Nuclear Weapons," U.S. Naval Radiological Laboratory, August 1966, USNRDL-TR-1060.
- GOODALE, T., "Effects of Air Blast on Urban Fires," URS Research Co., Burlingame, California, December 1970, OCD Work Unit 25341.
- \*\*GUESS, A. W., and R. M. CHAPMAN, "Reflection of Point Source Radiation from a Lambert Plane onto a Plane Receiver," Air Force Cambridge Research Center, TR-57-253, Library of Congress, Washington, D.C., 1957.
- \*\*HARDY, J. D., "Studies on Thermal Radiation," Cornell University Medical College, PB 154-803, Library of Congress, Washington, D.C., 1952.
- \*LAUGHLIN, K. P., "Thermal Ignition and Response of Materials," Office of Civil Defense and Mobilization, 1957, WT-1198.
- MARTIN, S. B., "The Role of Fire in Nuclear Warfare: An Interpretative Review of the Current Technology for Evaluating the Incendiary Consequences of the Strategic and Tactical Uses of Nuclear Weapons," URS Research Co., San Mateo, California, August 1974, DNA 2692F.
- MIDDLETON, W. E., "Vision Through the Atmosphere," University of Toronto Press, 1958.
- PASSELL, T. O., and R. I. MILLER, "Radiative Transfer from Nuclear Detonations Above 50-Km Altitude," *Fire Research Abstracts and Reviews*, 6, 99 (1964), National Academy of Sciences—National Research Council.
- \*RANDALL, P. A., "Damage to Conventional and Special Types of Residences Exposed to Nuclear Effects," Office of Civil Defense and Mobilization, March 1961, WT-1194.
- \*VISHKANTA, R., "Heat Transfer in Thermal Radiation Absorbing and Scattering Material," Argonne National Laboratory, May 1960, ANL 6170.
- WIERSMA, S. J., and S. B. MARTIN, "Evaluation of the Nuclear Fire Threat to Urban Areas," Stanford Research Institute, Menlo Park, California, September 1973, SRI PYU-8150.