

第 Ⅱ 章

HP『海軍砲術学校』公開資料

<http://navgunschl.sakura.ne.jp/>

第11章 電磁パルス（EMP）とその効果

第1節 EMPの原因と特性

序 論

11.01 在来の高性能爆薬の爆発で電磁信号が発生することから、核爆発により電磁パルス（EMP）が発生することが想像できる。しかしながら、EMPの影響の広大さと潜在的に強烈な特性はここ数年の間理解されていなかった。1950年代の初期の大気圏内核実験の間に電子機器が不調を来す原因として、除々にEMPが考えられ、これに対して注意が集中するようになった。誘導電流・電圧が予期せぬ機器の故障を生じ、引き続き解析によりそれらの故障におけるEMPの役割が暴露されるに至った。最後に1960年頃、種々の民需および軍用の電気・電子システムがEMPに対して弱点のあることが考えられ認められるようになった。同じ頃、このEMPを探知することによって核爆発が遠距離から検知できることが明らかになって来た。

11.02 先に述べた理由から、EMPとその影響を知るために理論的実験的努力がなされた。1962年に地上実験が停止されたときに若干量のデータが集められた。その後は、地下実験や現存する大気圏実験のデータ解析、非核シミュレーション及び理論計算に望みが託されている。理論的モデルの改善や将来を見通す研究に関連したコンピュータコードの開発に努力が払われ発展している。加えてシミュレータが開発されシステムと結合させたり応答させるための実験用パルスを発生させることができるようになった。

11.03 パルスの強度と持続時間と影響範囲は、爆発点の位置によってかなり変化するが、全てのタイプの核爆発——地下から高々度まで——がEMPをともなう。地表又は地表近くの爆発によって爆発近傍に最も強い電界を生ずるが、高々度爆発では、地表面においても電界が非常に広い範囲にわたり、また程度も強い

ので電気・電子機器にとって問題とされる。

11.04 核によるEMPは、急速に最大値まで増加しその後緩やかに減少するような時間的に変化する電磁放射線である。その放射線は非常に広い周波数スペクトルを有しており、非常に低いところから数百MHzに及ぶが、中心は無線周波数（長波長）領域である（図-1.74）。その上、放射線の振幅（強度）は、この周波数領域にわたって広く変化する。EMPは爆発の状態に依存する非常に複雑な現象であるが、本章の記述は主として定性的説明であり、時としては過度に単純化されているけれども、EMPの原因と、起こり得る影響の一般的なところは読み取れるであろう。

電界の発達

11.05 核反応によって放射された初期 γ 線や核兵器弾殻の残渣又は周囲の媒体と中性子との相互反応によって生じた γ 線（図-8.14）が、大気中における低高度爆発からEMPを発生させるプロセスに対する根本的な原因となる。 γ 線は空気の分子や原子と主としてコンプトン効果（8.89）によって相互作用を起し、爆発点周辺に電離領域を作る（8.17）。EMPに関する研究では、これは“堆積領域”ともよばれる。負に荷電された電子はより重い正の荷電イオンよりも早く外の方へ動き、その結果、初期に電荷の分離が生ずる。爆発点に近い領域では全てプラスの電荷を持つものに対して遠いところでは全て負の電荷を持つ。この電荷の分離は約 10^{-8} 秒即ち1マイクロ秒の百分の1（1.54脚注）の間に、その最大値に達するような電界を生じせしめる。

11.06 もしも爆発が完全に均質（密度一定）な大気中で起り、 γ 線が全方向に一樣に放射されるとすると、電界は放射状で対称的な球状に、即ち中心から外方へ全ての方向に同じ強さとなる（図-11.06 a）。このときは電離（堆積）領域から放射される電磁エネルギーはない。しかしながら実際にはそのような理想状態は存在せず、異った高度における空気密度の相違、地表の近接、爆発兵器の不均一な構成（弾殻、運搬手段等、補助装置も含む）電離領域の対称性に干渉する空気中の水蒸気量の変化等、種々の避けられない状態がある。爆発が地表又は地表近

くで起こると、球状の対称性とは明らかに離反する。これらのすべての状況では、電離（堆積）領域内では垂直方向だけに発生する電子流が存在する(図-11.06b) 時間的に変化する電流により、電流と直交する方向に最も強い電磁放射線の短いパルスの放射が起り、これがEMPである。高々度爆発ではEMPはすぐ後で述べるようにやや異なった方法で発生する。

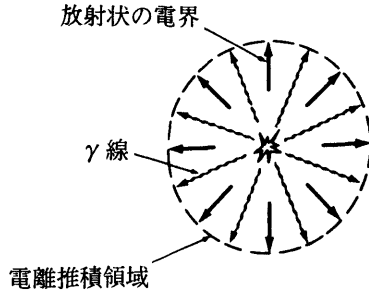


図-11.06 a 電離された領域が完全球形であれば対称的な放射状の電子界が生じる。

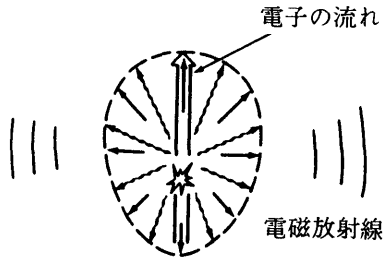


図-11.06 b 対称性が乱れていると電子の流れを引き起こす。それによって電流と直角の方向がもっとも強力であるような電磁放射線のパルスが放出される。

EMPの特性

11.07 非常に短い時間にその最大値に達した後、電界の強さは衰え、数十マイクロ秒の間に非常に小さくなる。パルスの持続時間が短いにもかかわらず、相当大きなエネルギーを有しており、特にMT級のときに大である。爆発点から光速で進行するとき、全ての電磁波と同じように(1.73)、放射線は金属やその他の導体で、丁度無線波がアンテナでキャッチされるように集められる。このとき、放

射線のエネルギーは強い電流と高い電圧に変換される。アンテナ等の収集器（装置）、つながれている電気・電子装置は、こうして強烈な損害をこうむる。例えば商用電力発電・配電システム及び電子計算機等のいかなるシステムに対しても影響は重大である。

11.08 EMPと良く知られた無線電波とは、重要な違いはあるが大まかには似通っている。無線送信機は個有の周波数（波長）の電磁波を送り出すように設計されているが、EMPは広い周波数範囲と振幅を有している。その上EMPによる電界の強さは、通常の無線波の数百万倍大きい。それにもかかわらずどちらの場合も電磁波のエネルギーは適当なアンテナ（又は導体）によって集められ、接続された装置に送られる。しかしながらEMPからのエネルギーは、非常に短時間にキャッチされるので、装置を損傷するような強い電流を生ずる。全体では同じ量のエネルギーであっても、従来の無線の受信のように長時間に拡散して受けるならば有害な影響はない。

11.09 EMPの特性は兵器の威力と爆発高度に大きく依存する。数マイルの高度の大気圏内爆発では、電離（堆積）領域は半径約3マイルであるが、爆発点が高度約19マイルになると、半径はおよそ9マイルに増加する。この高度領域では電離（堆積）領域の垂直方向の空気密度の相違は小さいので、EMPの影響は緩慢である。空気密度の非対称性によるEMPに加えて、高々度爆発では、11.14で述べるのと同じようにして短いパルスが放射される。高度数マイルと19マイルの間の空中爆発によって地上に発生する電界は、地表（又は地表近く）や高々度爆発によるものよりも小さい。後者の二つの型の核爆発は、ここでは概要のみを考えると後でこれらと空中爆発については詳しく述べる（11.66参照）。

11.10 EMP生成の機構は、地表（又は地表近く）と高々度の爆発とで異なる。地表爆発では通常下方に進む γ 線は、大地の上層で急速に吸収されるので本質的には電荷の分離やこの方向での電界は存在しない。しかし外方向及び上方向に進む γ 線は、空中に電界と電荷の分離を起す。従って垂直方向に電流が存在する（図-11.10）。その結果電離（堆積）領域は無線周波スペクトルにおける電磁パルスの

形で、そのエネルギーを放射するようになる。

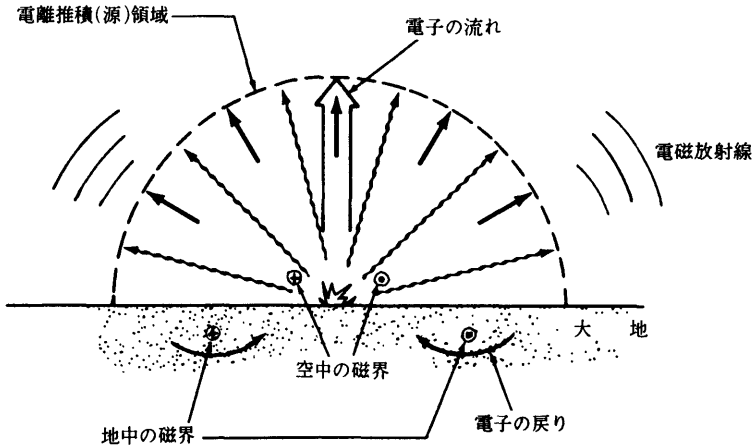


図-11.10 地表爆発におけるEMPの説明図

11.11 大地は、比較的良好な導体であるので、電子が電離（堆積）領域の外側から爆発点方向に戻る経路を提供する。なお爆発点は、正電荷が優勢的に残存している。こうして電流が大地を流れ、地表の爆発点領域に強い磁界が生じる。

11.12 地表爆発において生じた電界は非常に強いが、放射された電界は電離（堆積）領域からの距離の増加に伴って急速に弱まる。EMPによる電気・電子装置への潜在的な危険は、爆発の威力により、GZ周辺の半径約2～5マイルに広がる電離（堆積）領域の中及び近傍で最大となる。この領域では装置の入っている建物は、突風に対する抵抗力のない限り、特に高々度爆発の場合、強烈な損害を受ける。しかしながら電気・電子機器が地表爆発によって受けるEMPの脅威は、IMT爆発による最大過圧が2 Lb/in²となる距離、即ち8マイル（3章参照）付近にまで広がる。損害度は、装置の感応度と遮蔽物の大きさに依存する（11.33参照）。

高々度爆発におけるEMP

11.13 核爆発が高度約1マイル以上のとき、上方に進むγ線は、空気密度の低

い大気に突入し、吸収されるまで遠くに進む。他方、下方に放射される γ 線は、大気密度が増加する領域に遭遇し、この γ 線は空気の分子や原子と相互作用を起こし、EMP電離（堆積）の（発生源）領域を形成する（図-11.13）。ほぼ円形のこの領域は、中央部で50マイル以上の厚さがあり、端に近くなるに従って薄く、平均高度は25~30マイルである。また水平方向には非常に遠くまで広がっており、エネルギー出力と爆発高度によって増加する（図-11.70 a、b）。

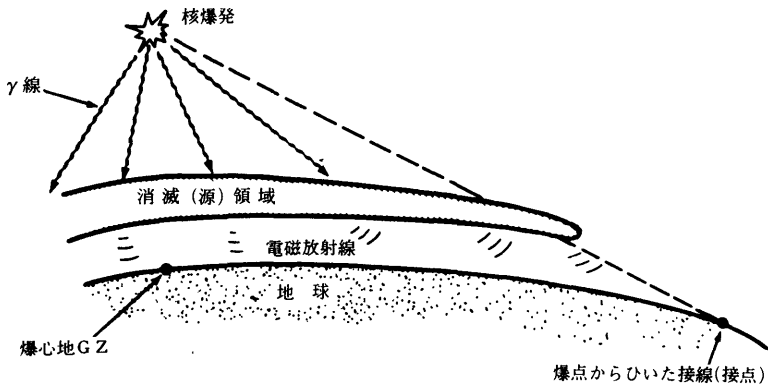


図-11.13 高々度爆発におけるEMPの説明図（電離領域の拡がり
は爆発の高度と出力により変化する）

11.14 電離（堆積）領域では γ 線が空気と相互作用を起こし、コンプトン電子を生成する。これらの電子は、地磁気によって進路を曲げられ、磁界の周りを回るようにしむけられる。この運動によって電子は、放射状に加速され、さらに複雑な機構により、地球の方に下降する方向のEMPを発生させる。生じたパルスは最大値まで上昇し、その後減少するが、いずれも地表爆発の場合により急速に行われるので結果的には、より多くの電磁エネルギーが高い周波数領域に現われる（§11.63）。高々度爆発で、地表において観測される電界の強さは、地表爆発による電離堆積（発生源）領域内の電界に比較して約 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{100}$ である。しかしながら、地表爆発で放射される電界の強さは、この領域外では急速に減少するので、高々度爆発の場合より小さくなる。後者の場合放射される電界は、地上の広大な地域と、大気中とでは大きくは変わらない。電界は地磁気によって影響を受けるが、E

MPの影響を受ける領域は、それ以上の隅々にまでもわたる。電界の強さの変化は、数百KTあるいはそれ以上の爆発の場合、2つより少ないファクターによるものである (§ 11.73)。

11.15 十分な高度での大爆発において、高い周波数のEMPによって覆われる領域は、爆発地点から地上すべての方向に、通視距離まで、即ち爆発点から水平線までも広がる(図-11.13。)低い周波数のパルスは、水平線より遠くまで広がる。例えば高度50マイルの核爆発の場合、地上の影響を受ける領域は、半径約600マイルであり、高度100マイルでは、地上半径は約900マイルである。米国の中心部直上200マイルで爆発すると国の全体が、さらにカナダやメキシコ国部分も同様に、EMPによる影響を受ける。このようにして高々度爆発では損害は、おそらく、夜間の眼の損傷 (§ 12.79参照)を除き、他のすべての影響が無視できる距離にまでも広がるであろう。その上放射線は光速で進むので、単発の高々度核爆発からのEMPにより、全領域がほとんど同時に影響を受けることになる。

EMPエネルギーの収集

11.16 地上又は空中爆発において、電離(堆積)領域内部又は接近した場所以外では、大地又はその近くの単位面積当たりの受けるEMPのエネルギーの量と割合は、核爆発の型式にかかわらず、ともに小さい。従って電気・電子システムに損害を起こさせるためには、適当な導体を用いて相当広地域のエネルギーを集める必要がある。しかし、ある種のシステムでは、主としてEMPの高い周波数成分により、相当量のエネルギーが小さな金属導体で集められ、高精度の部品を壊すことがある (§ 11.31)。そのエネルギーは収集器(アンテナ)から強い電流と電圧のうねりの形で、接続された装置に伝えられる。実際には、装置が直接収集器につながっていなければいけないというわけではなく、EMPのエネルギーは、他の方法でも結合(カップル)される (§ 11.27)。例えば、EMPのエネルギーを集めた導体と、この収集器につながっていない近接した導体に、そこから装置の一部にも電流が誘起したり、スパークが飛ぶことがある。

11.17 EMPからの電磁エネルギーの集まり方は、通常収集器の大きさ、形やパル

ス源に関する方向性及びパルスの周波数スペクトルに大きく依存しており、複雑である。一般的法則によれば、集められたエネルギーの量は収集器（アンテナ）としての導体の大きさにしたがって増加する。EMPに対する代表的な実効アンテナを（表-11.17）に示す。大地がエネルギーの高い周波数の部分を吸収し、シールドとして働くので、深く埋設されたケーブルやパイプ等は、通常、架設型の場合より影響が少ない。（11.68参照）。

表-11.17 代表的なEMPエネルギーの収集器

長く展張したケーブル、パイプ及びコンジット 大型アンテナ、アンテナの供給ケーブル、支持ワイヤー及びアンテナ支持塔 架空送電線や電話線及び支持塔 長く展張した電線やコンジット等(建造物中) 金属製の構造物の構成部(はり)、補強用バール(棒材)、並型の鉄板屋根 鉄道線路 アルミ製の航空機機体
--

EMP 損傷と防護の要約

11.18 EMPに対する種々のシステムや構成部品の感応度が、電磁放射線の鋭いパルスを発生しうるシミュレータによって研究されてきた（11.41参照）その結果は、個々の構成部品に発射されたEMPのエネルギーの量によるのか、それがつながっている回路の詳細に依存するのか判別できないので、決定的なものではない。しかし、ある種の一般的な推断が認められているようである。固体状の部品を使用しているコンピュータやその他の装置は、特に感応度が高い。コンピュータは配電や通信システムを含む商工業に広く使われているので、運用上の故障の影響は非常に重大である。真空管による装置（固体状の部分を使わない）や警報器システムに用いられているような低電流リレー、スイッチ及びメータは感じ難い。最も感じ難い電気部品は、モータ、トランス、ブレーカ等高压用に設計されたものである。運用上の混乱（一時的損傷）や損害に対する感応度に関係なく、どのような部品でも、大きな収集器と接続されているときには脅

威は増大する。逆に収集器が小さい場合には危険は減少する。従って、トランジスタ化された回路は通常EMPの影響を受けやすいが、携帯用（電池駆動）の非常に短いホイップ又はフェライトコア・アンテナを用いたラジオは、収集器に接近しない限り簡単には損害を受けない。装置を主電源から離すことにより、捕集されるエネルギーは減るが、それは装置の使用を否定することとなり、一般に、実行することはできない。

11.19 装置をEMPの損害から防護ないしは強化するのに可能性のある種々の方法がある。通常このような防護は現存するシステムに対しては困難ではあるが、新しいシステムに組み込むことは可能である。提案されている強化策は次のとおりである。放射線の侵入を妨げる金属シールド、大きな電流をそらす良好な接地、避雷に用いられるのと同じようなサージの阻止装置、適切な架線の配置。最終的には鋭いパルスの電磁エネルギーの損害を受け易い部品を除去することである。これらの処置についての検討は、本章の後の方で論議する（\$ 11.33参照）。

11.20 EMP以外の影響が支配的な地表爆発の近くの地域を除き、核爆発により生じるEMP放射線は、人間にとってみれば遠くの雷のいな妻程の危険もないと考えられている。猿と犬の実験によって、数カ月間、1つずつ或いは繰り返して継続的にパルスを加えても、有害な影響のないことが分った。しかし、長い線・パイプ・導管・その他のかなり大きい金属等、表-11.17に挙げられている実効的な収集器のEMPエネルギーに人が直接接触すれば、強烈なショックを受けるであろう。

システム内発生EMP

11.21 核爆発によるγ線と大気（又は大地）との相互作用で生ずるEMPに加えて、“システム内発生EMP”（SGEMP）と呼ばれる別の型の電磁パルスがある。これは核（又は電離）放射線、特にγ線やX線と、電子システムに組み込まれている種々の固体物質との相互作用により、生じる電界に起因するものと考えられる。これによる効果には、電子の前方及び後方散乱放射と、電流の内部及び外部発生が含まれる。

11.22 S G E M Pは、高々度爆発の核放射線に直接暴露する電離（堆積）領域より上空の衛星や弾道システムの電子部品にとって最も重要である。S G E M Pはまた、地表及び中高度爆発時、堆積領域中の、他の影響による損害を受けないシステムにとって特に重要である。比較的小規模爆発においては、暴露している地上の装置、大規模爆発においては、空輸（航空機）システムが影響を受ける。

11.23 S G E M P現象は、実際には極めて複雑であるが、簡略的には次のように生ずると考えられる。電子システム就中外部E M Pから防護するためシールド設計されたシステム中の固体物質は、空気中にあるものよりも重い原子を含んでいる。従って γ 線と高エネルギーX線の相互作用により、コンプトン効果と光電効果による電子を生ずる（§ 8.89参照）。そしてさらに、これらの電子は電離を生じて、固体物質との相互作用により二次電子と呼ばれるより多くの電子を放射する。このような電子は、固体物質の両表面又はその近くに直接又は間接的に発生し、表面に直交する速度成分を持ち、物質表面から放出される。その結果、表面近くに電界が発生する。その他の影響もあるが、ここでは考えない。

11.24 部品の内部に約 10^{-3} mmHg以下の非常に圧力の低い空洞があると、その内壁近くに約10万～100V/mの非常に高い電界が生ずる。しかし、より高い圧力では、電子は気体即ち空気に実質的な電離を起こし、それによってより低いエネルギーの二次電子をはじき出す。比較的大きな数の二次（伝導）電子により、電界を打ち消す方向の電流を生じ、高エネルギーの電子は空洞を越えて容易に動けるようになる。

11.25 電離放射線と電子システム中の物質との直接的な相互作用で壁の側に生じた電界により、部品やケーブルやアース線等に電流が誘起され、外部E M Pと合流して損害や破壊の原因となる大きな電流や電圧が作り出される。S G E M Pに至る相互作用は、その複雑さのために、これによる影響を予想することは難かしいので通常は、核爆発で生じるE M P放射線をシミュレートするため設計された装置により放射されるパルスによって決定される（§ 11.42）。

高々度実験におけるEMP実験

11.26 EMPによる電気及び電子装置の損害の現実性が、種々の核実験やEMPシミュレータの利用によって認められた。1962年太平洋ジョンストン島海域で行われた高々度爆発実験で、EMPのため民間の電気システムに多くの故障が発生したと報告されている。最も確かなケースの1つは、爆心地から800マイル離れたハワイのオアフ島の各所に設置された街灯の30本の線（直列に接続したループ）の同時故障である。その故障はトランスの2次側に設けられた“ヒューズ”と呼ばれる装置（器具）に発生した。ヒューズの目的は、突然の電流サージにより、照明システムが損害を受けないようにすることである。個々の街灯に付けられた同じようなヒューズには影響を受けなかった。ホノルルの数百の盗難警報が鳴り始め、電力線の数多くのブレーカが開いたことも報告されている。これらの事象は、多分、EMPエネルギーが、装置の接続されている線と“結合”したためであり、装置そのものの故障ではないであろう。これらはEMPに対して最も感応度が小さいので、たいした損害も起こらなかった (§ 11.18)。

第2節 EMPによる損害と防護⁽¹⁾

EMPエネルギーの結合（EMPのユーザシステムへの作用）

11.27 EMPエネルギーとシステムとの“結合”には基本的に3つの型がある。それらは電気誘導、磁気誘導及び抵抗性結合（時には直接電荷吸収と考えられる）の3つである。電気誘導は、導体の長さ方向の電界成分によって、導体に電流が誘起する。磁気誘導は閉ループを構成する導体中に起こり、ループの平面に直交する磁界成分によって、ループ中に電流が流れる。ループの形は重要ではなく、どのように導体と接続されたとしても、たとえばコンクリート中の鉄骨であっても、ループを構成する。抵抗性結合は、導体が電離空気、塩水、大地等の伝導媒体に侵されたときに起こる。既に述べた結合型の一つで、媒体に電流が誘起すると、導体は他の一つの伝導路を形成し、媒体と電流を分け合う。

11.28 EMP波が大地に衝突すると、そのエネルギーパルスの一部は空中から地表面を通して伝えられ、残余は反射される。架設電力線や無線アンテナ塔のような、地上の収集器に直接又は反射されたパルスによりエネルギーが与えられる。正味の影響は二つのパルスの重なり具合による。地中に送り込まれたEMPは、誘導と抵抗性結合のいずれかにより、地中の導体に電流を生ずる。

11.29 電磁エネルギーと導体との結合は、導体の最大寸法が放射線の波長にほぼ等しいときに、特に影響は大きい。このとき導体は、この波長に一致した周波数に対して共振する。あるいは、アンテナとして働いたという。EMPは広い周波数スペクトルを有するので、このスペクトルのごく一部が特定のアンテナの形状に最も効率よく結合する。このように、個々の関心のある収集装置について、部品の構成と同じように全体的な構成についても、注意を払って研究する必要がある。表-11.17に示したような最も実的な収集器(装置)は複雑で、捕集されたEMPのエネルギーの量を決定するのは、非常に難しい問題である。コンピュータ法や実験的シミュレーションが解法を得る助けとして用いられている。

部品と装置の損傷

11.30 EMPを浴びることによる電気・電子装置の性能の低下は、機能上の損傷や運用上の不調を起こす。機能上の損傷は永久的な破局的故障である。例えば、ヒューズやトランジスタなどの部品や装置の焼失や、機能全体にわたって作動する部品や、サブシステムの無能力化である。一方運用上の不調は、数分の1秒から数時間まで、装置の一部を使用不能にする一時的な損傷である。スイッチやフリップフロップの状態変化もその一例である。運用上の不調を起こすのに十分なEMPのエネルギーの量は、通常機能上の損傷の場合より数桁小さい。

11.31 多くの電子装置は、EMPにより機能上の損傷(焼失)を極めて受け易い。実際の感応度は、部品を含む回路や半導体の特性と、固体素子の詳細な組み立てに依存する。通常、表-11.31に示した部品は、電磁エネルギーの激しいパルスによる損傷に対して感受性を小さくするために用いられる。

EMPシミュレータによる試験によって、約 10^{-7} ジュールの非常に短かいパル

スによってマイクロ波用の半導体ダイオードが損傷を受け、ほぼ 5×10^{-2} ジュールでオーディオ用トランジスタが損傷を受けるのに対して、真空管の場合1ジュールを要することがわかった。従って真空管を用いたシステムは、固体部品を用いたものよりも、EMPに対する感応度がずっと小さい。マイクロ電流計や低電流リレーを損傷する最小エネルギーはほぼオーディオ用トランジスタとほぼ同じである。

表-11.31 感度を下げるための電子部品

マイクロ波のダイオード 電界効果用トランジスタ(FET) 高周波トランジスタ シリコン制御整流素子(SCR) 低周波トランジスタ 整流用ダイオード式 真空管
--

11.32 前述のごとく、個々のシステムやサブシステムその他部品のEMPに対するぜい弱さは、主にアンテナ等の収集器の特性によって決まる。劣悪な収集器と接続している感応度の高いシステムが受ける損傷は、効率のよい収集器と接続している感受性の低いシステムよりも小さい。あらゆるケースで、同じEMPエネルギー収集器を使ったとき、電気・電子システムの影響を受ける度合いは、表-11.32に示すとおりに分類される。しかしながら、集められたエネルギーの量が、常に損傷に対して、十分な基準となるとは限らない。例えば、EMPサージが、時としてアークを生ずる引き金として働いたり、正常な使用電圧でも装置の一部に損傷を引き起すような状態変化を生じさせたりする。従ってEMPに対する感応度を解析するためには、収集されるエネルギーだけでなく、運用上の不調や損傷の機構について考慮する必要がある。

表-11.32 EMPの影響を受ける度合い

最も過敏なもの	
低電力、高速デジタル式計算機、トランジスター式・真空管式を問わず(でたらめな動作する)トランジスター又は半導体使用の整流器を用いたシステム(シリコン又はセレンウムとも)	
計算機及び電源	
長く張り回らされたケーブルの特にサイト間を結ぶ端末にある半導体式機器警報システム	
通話装置のシステム(内部連絡用)	
生命維持用システム制御装置	
トランジスターの組込まれた電話器	
トランジスター式の受信機や送信機	
60から400C P Sの間のトランジスター化された周波数変換器コンバータ	
トランジスター化されたプロセスの制御システム	
動力システム制御や通信の接続装置	
中程度のもの	
半導体式整流器を含まない真空管式の機器	
送信機	通信装置(内部連絡用)
受信機	テレタイプ電話
警報装置	動力供給装置(電流)
低電流スイッチ、継電器及びメータ使用機器	
警報器	インジケータパネル(パネル表示器)や
生命維持用システム	ステータスボード(状況表示板)
動力システム制御パネル	プロセス制御
損傷を受ける器物:	
爆薬	混合爆薬
導火線	ロケット燃料
火工品	
その他:	
長く張り回らされた碍子使用の動力ケーブル	
高エネルギー用コンデンサーを備えた装置	
誘導子(コイル)	
最も鈍感なもの	
高電圧の60C P S用機器	
変圧器、モータ	ロータリーコンバータ
ランプ(フィラメント式)	童負荷用リレー
ヒータ	サーキットブレーカ
	空気絶縁型電力ケーブル

防護方法

11.33 EMPに対するぜい弱さに関して、システムを試験する一般的な方法は、次のように段階的に行われる。第1は、システムの部品と素子に関する情報が集められる。その情報は、それらに対する最も悪い暴露の状態の感応度と、その物質としての影響され易さの両面から類別される。システムの接続においては、一部に集められたエネルギーは、直接又は間接的に（誘導により）、他の部分をも結合（カップル）するという事に注意しなければならない。目標とする基準を使用することにより、問題となる領域は明らかになり、解析され、試験される。欠陥を修正するため必要に応じて適切な改良（変形）がなされ、その後、修正されたシステムが検査され試験される。この手法が提案され新システム又は既にあるシステムについて行われるが、経験的には、EMP防護のための経費がしばしば妨げとなるので、結局はシステムの弱点と設計段階から早く考慮することが望ましい。

11.34 EMPの損害に対するシステムの強化のために用いられる（実用化法）のいくつかを以下で述べる。論議は、高度な技術と特殊な領域の包括的な取扱いよりも、一般的な技術の提示をねらっている。EMPの脅威に対する強化の方法のいくつかは、適切なシールドの回路設計、完全なアース、及び種々の防護素子の使用である。これらの方法が適当でない場合、装置本来の用法と両立できるならば、固体部品よりも真空管で装置を設計することが賢明である。

11.35 いわゆる電磁シールドは、連続的な金属、例えば鋼、軟らかい鉄、銅のシールドで防護すべきシステムを覆うことである。個々の部品や小さいサブシステムのシールドは、作業が複雑であるので、余り実用的ではない。独立した部分のシールド、一つの厚いシールドよりも薄いいくつかのシールド、連続的な接続等により良好なシールドが得られる。シールドは、アースや帰還用導体として用いられるべきではなく、また影響を受け易い装置は、シールドコーナーから離さねばならない。シールドにおけるすき間は、できるだけ無くさねばならず、戸は、閉じたときに完全なシールドとなるよう、金属シートで覆わなければならない。閉じることのできないベンチレータは特別の型のスクリーンか、又は導波管で防護

しなければならない。シールドの効果を危うくしないために、パイプや導管や金属被覆ケーブルのような導体ハウジングの貫通に注意を払わねばならない (§ 11.59)。

11.36 回路設計においては共通アース点・ケーブル対のより合せ、システムを内部システムの“木”の形の配線(放射状のスパイク)、ループ形成と他の回路との結合の回避、導管と覆皿、シールドされた独立トランスの使用が推奨される。シールドしたケーブルでのアースによる帰還の阻止も勧められる。いくつかの処置法が、通信・電力技術から得られた。

11.37 EMP防護の観点から、ケーブル設計において、シールドと回路の実用法を発展させた。すなわち、深く埋めこむ(地中3フィート以上)ケーブルや、シールド層の継目の連続性及び良好なジャンクションボックスによる接触が望ましい方法である。普通に用いられている編んだシールドは避けるべきである。経済性から妥協できなくなることがあるが、そのような場合は十分でないことが証明されるであろう。

11.38 良好な接地の実現は、EMPによる損傷に対するシステムの感応度を減少させる助けとなる。接地は、局地的な地球表面に対して、比較的低いインピーダンスを有する回路の一部となると、一般的には考えられている。しかし、この定義を満足させる特別なアースの配置は、最善ではなく、EMP防護に対しては、アースがないよりも悪い。通常、アースは、電子回路のシャーシ、“低い”普通のバスのアンテナは地球に打ち込まれた金属棒と同一と見られている。最後の場合は、局地的土質の状態にきわめて依存しており、それは、アース回路に抵抗板結合電流が流れる結果による。EMP防護に対する良好な出発点は、回路群に対して、一点アースをとることで、通常は最もインピーダンスの低い部品で——地球に電氣的に沈め込まれたシステムの最も大きい部分、例えば永遠システムを——とることである。

11.39 上記の手段を補うために、種々の素子が用いられている。これらは、ラジオやテレビの送信アンテナを落雷から守り、電力線をサージ電流から守るのに

用いられる方法と関係がある。例えば、避雷器・スパーク間隙、バンドパスフィルタ、振幅制限器、ブレーカ・ヒューズ等で、代表的な防護装置は、ケーブルの地下への入口の「EMP室」航空機アンテナの供給点、電話線、シールドルームの電力入力パネルに見られる。小さいものでは、ダイオード、非線形抵抗、SCRクランプ、その他が回路盤やキャビネットの入力パネルに組み込まれている。

11.40 上記の装置は、それぞれ、応答スピード、電圧等級、電力消費能力、復帰時間等に制限があるために、それ自身では、特定の問題を完全に解決するには不十分である。それ故、最も申し分のない防護装置としては、複合したものとなる。フィルターは、EMPの立上がり時間を引き伸ばし、避雷器が作動するまでの十分な時間をもたせる。通常、複合型の防護装置は、各適用に対して特別に設計しなければならない。

試 験

11.41 EMPに対する応答はその複雑さのために、解析に基づく予言に全幅の信頼を置くことはできない。試験は、設計段階の早期に、素子や部品や完全なシステムの解析結果を立証するために必須のものである。試験は、また、予想しない影響を看破するために用いられる唯一の既知方法である。これらは、結合や相互作用モードや、設計の過程で見落されたぜい弱点等である。簡単なシステムでは、非線形相互作用効果が数値的に解析されたが、通常基準では、これを看破するためには、試験が必要である。試験の結果、独創的な近似式が今後の解析のためにみがき上げられ、より複雑な問題に対する解析能力がデータの改善された。試験により、経済的な改善に間に合うように、部品やシステムの弱点や感応度の高い部位がつかとめられた。さらに改善のあと、試験によって性能が標準まで引き上げられたことを確認する。完全なシステムとしては、所望のレベルまで強化されていることを確認するために再試験がされなければならない。引き続き定期的な試験で、環境や人間の要因による劣化が起こるかが分る。

11.42 大気中の核実験の中止以後、システムのEMP強化試験のため、シミュレーションに大きな信頼が置かれている。EMP試験の等級は、(1)低いレベルの

電流マッピング、(2)高レベルの電流注入、(3)高レベル電磁界である。低レベルの電流マッピングは、試験の初期に行われる。システム電波を切り、内部ケーブルを低レベル電界に置く。これにより後の作業に対する推察ができる。示された改善を行った後、非直線性を見つけ出し、システムの影響の初期の徴候を暴露するために、システムの電源を入れ、高いレベルの電流を直接システムに流入させる。サブシステムがうまく働かなければ、研究所で広範囲なサブシステムの試験を行うことは望ましくない。最後に、高レベルの電磁器における試験が必須とされる。

11.43 励起の型式が、どのような試験でも明らかにされねばならない。2つの主な選択は、(1)時間領域でのデータを得るための波形シミュレーション、(2)周波数領域でのデータを得るための持続波(CW)信号である。測定されたシステムの応答に対して、周波数領域でのシステム解析に合致させるのが目的の場合には、CW信号がより適当であろう。しばしば、試験の結果が電子的な数居値(スレッショールド)と近似している場合には、時間領域における試験が必要である。完全に解析するためには両試験とも考慮しなければならない。

11.44 大規模シミュレータが大型システムの最終試験のために必要である。大規模シミュレータの2つの主な種類は、試験対象物に電磁波を導き履歴させる金属構造物と、対象物に対して電磁界を放射するためのアンテナである。各形式のシミュレータは、パルス発生器(時間領域)か、又はCW信号発生器(周波数領域)を用いる。パルス発生器自身は、高レベル信号発射か低レベルのそれを繰り返す装置である。

11.45 導波管又は伝送路シミュレータの本質的な構成要素は、パルサー、変遷部、作動室及び終端である。電磁波の適当な振幅や波形は、パルサーにより送られる。この波は、伝送路の細くなる部分により、パルサーの小さな断面の出力端から作動室へ送られる。試験対象が置かれている作動室では、対象に対して均一な電界を与えられるよう十分に広くなければならない。この状態は、許容される電界の乱れの度合にも依るが、試験対象が作動室の約 $\frac{1}{3}$ 以下のときに満足される。終端の領域では、波が試験室に戻る反射を防ぐ。すなわちこれは、伝送路の特性

インピーダンスと等しい幾何学的に小さな抵抗負荷で波を導くインピーダンスを有する変遷部から成る。

11.46 放射シミュレータの基本的な形は、長い線や二重錐形ダイポールや円錐形ダイポールである。長い線は、通常地表に平行に置かれた長いダイポールである。それは、地上に高耐圧絶縁体による非伝導性ポールによって支えられる。ダイポールの2つのアームは、中心に対して対称であり、灌漑パイプのような軽い円筒形の導体で組み立てられている。パイプの径は、中心から離れるに従って小さくなっており、電流波形を形づくり共振を小さくするため、パイプの間に抵抗が置かれている。ダイポールの2つのアームは、反対に荷電され、ダイポールの中央のスパークギャップ間の電圧がブレイクダウン電圧に達すると、ギャップは伝導し始め波面はギャップから伝搬されて行く。

11.47 円錐及び二重円錐アンテナでは、静的な表面電荷の放電に依らずに、マルクス発振器やCW送信器等のパルサーを使用する。アンテナは、軽量導体の表面か格子状の線で構成する。

11.48 システムの実物大試験に代わって電磁的縮尺模型が、重要となることがある。瞬間の開放や不良結合を模型に導入することは難かしく、また、これがしばしば内部電界を制御するので、模型化する際の有益性としては、外部の電界・電圧・電流の測定ができることに限定される。一度これらのパラメータが複雑な構成に対して解明されたら、多分、解析によって内部の電源の性質が分かるであろう。

EMPと電力システム

11.49 商用電力システムに対するEMPの起こり得る脅威は、落雷やスイッチング時のサージの影響を考えることにより分かる。電力システムでは、雷に対する防護は、架設のアース線と種々の型式の避雷器によって成し遂げられる。架設アースは有効に接続することによって、位相導体から雷のサージの殆んどを防護することができる。しかし、このようなアースは、EMPに対してごく部分的にしか防護できない。その上、雷の影響とEMPのそれは類似点はあるが、電流(電

庄) パルスの性質に相違があり、避雷器はEMPに対しては殆んど有効ではない。

11.50 高々度爆発時のEMPによって、架設の送電線に誘起された電流の成長と崩壊の一般的な仕組みは、図-11.50で計算された曲線により示されている。この曲線の詳細は、状態により変化するが、代表的な電流パルスの形は示されたとおりであり、1マイクロ秒の数分の1で数千Aの最大値まで極めて急速に上昇し

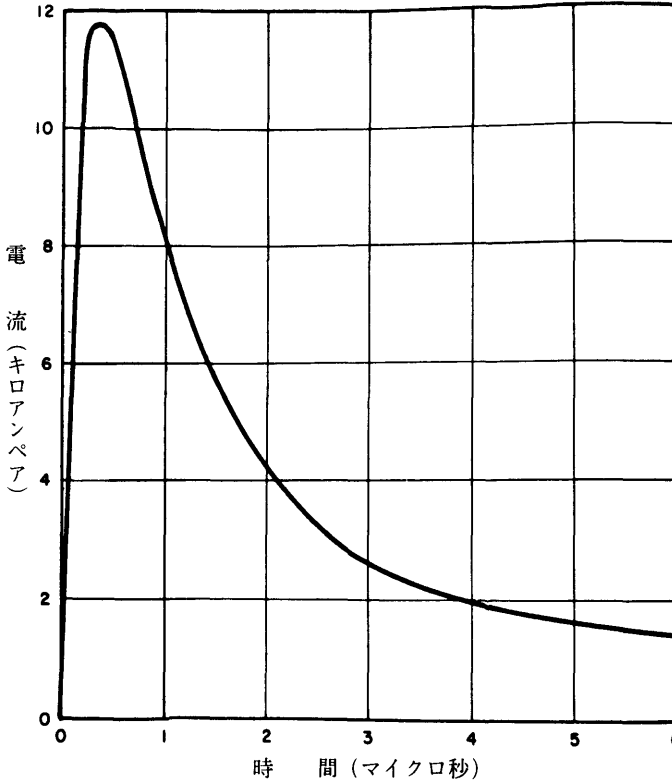


図-11.50 高空核爆発のEMPにより架空電線路内に励起されて生じる典型的な電流のパルス (生じる電流の大きさや時間は各種条件要素により多少変化する)

1 ミリ秒以上かかって減少する。落雷により架設の電力線に生ずるサージ電流の場合には、最大値までこれより緩慢に増加し、EMPよりも長い間持続する。その結果、古い従来の避雷器では、雷に比較して高々度爆発のEMPに対しては効果

が少ない。しかし最近の避雷器は多用途で、EMPに対しても防護でき、さらに複合避雷器（§ 11.40）では、もっと良いと期待される。

11.51 十分に防護がされていなければ、EMPにより架設電力線に生じたサージ電圧は、特に中・低電圧の回路において絶縁破壊を起こさせる（高圧送電システムの部品は、EMPサージ電圧に耐えうる）。もしも高々度爆発で破壊が起これば、広い範囲にわたって多くの人が体験するであろう。このような同時に複合した破壊が起これば、システムは不安定になる。

11.52 電力線が励起されるかまたはそれが止められるときにスイッチングサージが起こる。中・低電圧のシステムでは、このようなサージは、スイッチ回路のブレーカを誤って作動させるが、スイッチングサージにおける電流の上昇は、雷よりもなお遅いので、EMPの影響はさだかではない。超高圧（EHV）線、即ち500KV以上では、スイッチングサージは、EMPと同じように急速に増加し放射される電磁界と合流する。制御及び通信用ケーブルに誘起する電流は、近接する装置に損傷や不調を引き起す。EHFの切替所に必要な防護法の開発に関して得られる情報は、EMP防護にも適用できる。

11.53 電力工業においては、制御及び通信回路に真空管の代りに半導体素子を使用する傾向が強くなっている。しかし、EMPに対して固体素子は、特に感じ易い。パルスから受ける少量のエネルギーでも、誘動作や一時的故障を起こす。自動負荷制御のために用いられるコンピュータは、特に感じ易く、永久的な損傷は起こさないほどの少量のEMPエネルギーにより誘動作や一時的な故障を起こす。このような装置の防護には特別の注意が必要である。

EMPと無線局

11.54 地中に埋設して適当な防護策をとらないと、電力線や電話線は、相当量のエネルギーが無線（テレビ）局に持ち込まれる。しかし、このエネルギーの主な収集器は、無線周波領域の電磁エネルギーを送受するよう設計された送信（受信）アンテナである。EMPから集められるエネルギーは、主としてアンテナの設計された周波数に近い周波数のものである。

11.55 アンテナの支柱（又は塔）は、よく落雷するので、スパークギャップが、局の装置を守るため、塔の根本に取り付けられている。しかし、電力線で用いられるようなギャップを共通して使うと、EMPに対して効果がない。実際に、アンテナに落雷したときはスパークギャップよりもむしろ支線の方が、雷の雷流の殆どをアースに流す。長さに沿って支線には絶縁物が入っているが、それを超えてアークを発生し、これによって電流が流れる。しかも、この絶縁物の破壊は、EMPに対する防護とはならない。事実、支線は、誘導によりEMPエネルギーに対する付加収集器として働く。

11.56 直接間接の防護装置にもかかわらず、雷による無線局の損傷はひん繁である。最も共通して損傷を受ける素子は、アンテナの根本の整合器のコンデンサであり、通常、誘導体の故障を起こす。位相回路のコンデンサとコイルも損傷される。高耐圧コンデンサは、EMPによる損傷を受け易いと考えられる。このような損傷の結果、コンデンサを通してアンテナ結電線がアースとショートし、コンデンサを取り替えるまで送信できなくなる。雷の経験から、誘雷体破壊による同幅伝送線にも損傷が起こることが分る。無線局に現在、一般に使用されている固体素子は、勿論EMPによる損傷を受け易く防護する必要がある。

11.57 無線送信局では、自分自身の信号の相互作用を妨げるために、種々の手段が用いられている。これは、可聴周波ラインや低レベル信号が流れる部品のシールドや1点アースやループの防止のためである。このような方法は、EMPの脅威を減少させるにも有効である。

EMPと電話システム

11.58 電話システムの多くは部品は、電力供給線や信号を伝える加入者線・トランク線に集められたEMPエネルギーにより損傷を受け易い。種々の避雷装置が架設電話線に一般には用いられているが、最適に修正しなければ、EMPに対する防護には限度がある。米国内の長距離電話網には、核爆発の他の影響と同じようにEMPとも両立できるよう、能力向上が図られている。

11.59 適切に強化されたシステムでは、同軸ケーブルも地中に埋められ、主・

注：(2) 本章の以下のところは省略しても良い。

補助中継・交換局も同様である。主（中継の交換）局の建物は、完全に金属EMPシールドで覆れている。金属フラッシングが金属線、例えば、パイプ“導管”被覆ケーブル、建物の出入口を覆い、フラッシングは、ラインやシールドと接続されている。これができないときには、防護装置やフィルターがEMPサージの損傷を最小にするように利用される。建物の内部では、接続ケーブルは短く保たれ、通常最短距離でつなぐ。非常用電源は、商用電力源の故障（切断）時に運用の続行を可能にする。地下の補助（中継）局は、外部シールドはないが、電子機器は金属ケースで保護される。

第3節 EMPの学説⁽²⁾

放射状電界の発達

11.60 核爆発による初期 γ 線のエネルギーは、空中でのコンプトン散乱が主たる光子の相互作用となるエネルギーである（図-8.97b）。散乱された光子は、しばしばコンプトン過程を繰り返すに十分なエネルギーを維持する。散乱はランダムであるが、発生した自由電子（及び散乱電子）は、平均的には爆発点から放射状に拡がる。正味の電子の動きは、コンプトン電流と考えられる電流となる。初期 γ 線は、約 10^{-8} 秒程度で急速に最大値まで増加し、コンプトン電流も、同じような時間変動をする。

11.61 γ 線の流れにより電子が放射状に外方へ運動するとき、それらが飛び出したあとの原子や分子、即ち正イオンは、さらにゆっくりと外方へ運動する。その結果、部分的な電荷の分離と放射状の電界が起こる。コンプトン電子の衝突で生じたよりエネルギーの低い（二次）電子は、電界によって正の電荷の方へ引き戻される。その結果、反対方向の電流が生じ、電界が強くなると増加する。これは、ある電界強度を持ち、その大きさは電離媒体の電導度によって決まるので、伝導電流と呼ばれる。電導度は、コンプトン効果により発生した電離の広さに依るので、媒体の電導度は、コンプトン電流が増加すると大きくなる。従って、放射状

電界の強さが増すと、伝導電流はこの電界に逆らう方向に流れるので、ある時刻には、電界は増加が止まる。このとき電界は、飽和した、と言われる。爆発点の近くでは、放射状電界は、直ちに飽和点に達し、より遠い点よりいく分か強くなる。

11.62 完全に均一な媒体では、 γ 線は全周に一樣に放射され、放射状電界は、球状に対称的となる。電界は、電荷の分離された領域に制限され、エネルギーは放射しない。短時間内に、電離媒体での電荷には再結合が起こり、数マイクロ秒以内に、全放射状方向の電界強度は弱まる。電離された球形中に吸収された γ 線のエネルギーは熱放射線（熱）にまで低下する。しかし、電離球体の対称性が乱されると、非放射状の発振が始まり、主として無線周波領域の電磁パルスの放射として、エネルギーが放射される。実際には、核爆発では必然的に対称性が乱されるので、環境に応じた強さのEMPが放射される。

EMPの一般的種類

11.63 EMPにおける放射線は、コンプトン電流の立上り時間で最大値が決まり、広い周波数領域を有する。これは、代表的には 10^{-8} 秒のオーダで、上記の機構に対する最大の周波数は、約 $10^8\%$ 、即ち 10^8Hz (100MHz)である。しかし、放射線のほとんどは、無線周波領域の低い方で放射される。立上り時間は、一般には、地表や中高度爆発より高々度爆発の方が短いので、高々度爆発におけるEMPのスペクトルは、他の爆発の場合より高い周波数の方に広がっている。

11.64 核爆発による初期 γ 線によって、平均的には、爆発エネルギーの0.3%が運ばれ(表-10.138)、そのごく一部、高々度爆発では約 10^{-2} 、地表爆発では 10^{-7} のオーダがEMPで放射される。高々度での1MT爆発では、全放射エネルギーは、 4.2×10^{22} エルグで、EMPとして放射される量は約 10^{18} エルグ(10^{11} ジュール)である。このエネルギーは非常に広い範囲にわたってばらまかれるが、収集器が1ジュール程度、EMPエネルギーを拾い出すことは可能である。非常に短いパルスとして受けられた1ジュールのうちのごく一部でも、電子装置に永久的又は一時的な劣化を起こすことができるという事実によって、EMPの脅威の重大さが分る。

11.65 総べての核爆発でEMPは発生するが、EMPの見地から、3つのいく分明確な（極端な）爆発型式について考えると便利である。これらは、中高度空中爆発と地表爆発と高々度爆発である。中高度爆発は、電離（堆積）領域が地表と接していない約19マイル以下のものである。球形領域の半径は、約3～9マイルであり爆発高度によって増加する。電離（堆積）領域が地球と接する低高度空中爆発におけるEMPの特性は、中高度と地表爆発の間である。爆発高度1.2マイル以下では、放射パルスは地表爆発と同じ特性を有する。

中高度空中爆発

11.66 中高度空中爆発では、空気の密度は上部より下部の方が幾らか大きい、電離（堆積）領域の半径とともに、即ち高度とともに大きくはなるが、その差は大した違いはない。コンプトン衝突の頻度と空気の電離は、空気密度と同じように変化する。対称性は水平方向に影響を受けていないので、非対称形となる結果、正味の成分が上方に向かい電流が生ずる。電流パルスは電離した空気の中で発振を始め、エネルギーが、短い電磁パルスの形で放射される。EMPは広い周波数と振幅の範囲にわたるが、エネルギーの多くは低い無線周波領域内にある。加うるに、地磁気によるコンプトン電子の帰還の結果、高い周波数の持続時間の短いパルスが放射される（§11.71）。

11.67 空中爆発により放射されたEMPの電界の大きさは、その威力、爆発高度（大気の密度傾斜による対称性に影響を与える）、兵器（補助装置、弾殻、運搬手段を含む）の種別で生ずる非対称性に依存する。電離（堆積）領域の外の点では、空気密度の相違により生ずる低い周波数のEMPに対して、爆発点からの距離の点での時刻Tにおける電界強度E(t)は、

$$E(t) = \frac{R_0}{R} E_0(t) \sin \theta \quad (11.67.1)$$

ここで、 R_0 は、電離（堆積）領域の半径、 $E_0(t)$ は、時刻tにおける距離 R_0 、即ち、放射領域の始端での電界強度、 θ は、垂直と爆発点と観測点を結ぶ線の成す角である。式(11.67.1)から§11.06に述べたように、EMPの電界強度は、（垂直の）電流に直角な方向で最大になることが分る。 $E_0(t)$ と R_0 は、特定

の状態に対して計算機により求められ、 $E_0(t)$ は、通常数十～数百V/m、 R_0 は、3～9マイルである (§ 11.09)。 γ 線と空気との相互作用は、距離に対して指数関数的に低下するので、電離(堆積)領域には正確な電界はないが、 R_0 は、伝導度が 10^{-7} V/m(mho) 以上になる距離を採用する。

地表爆発

11.68 地表に接した爆発では、大地の存在により、強力な附加的な非対称性が持ち込まれる。空気に比べて大地は、中性子や γ 線を良く吸収し、しかも電気を良く通す。従って、電離(堆積)領域はほぼ半球形になり、上方向に強い成分を持った正味電流を生ずる。さらに、大地の良伝導性により電流ループが形成され、実質的な電子の帰還路を形成する。この電流ループにより、特に大地近くの電離(堆積)領域において、爆発点の周囲を(大地を見下して)時計方向に回る非常に大きな水平方向の磁界が発生する(図-11.10)。爆発点に非常に近い点では、空気は、強く電離され、電導度は大地のそれを超える。そして、伝導電流が大地に移る傾向は弱まり、大地と空中の磁界は均衡して減少する。

11.69 電離(堆積)領域による電界に加えて、大地に、EMPに寄与する大きな電磁界が発達する。電磁界の大きさや形に影響を与える多くの変化が生じるので、これらを簡単に述べることは不可能である。電離(堆積)領域の境界での最大電磁界は、地球に沿った方向では、同じような空中爆発の場合の十～百倍強い。地表面に沿う最大電界の距離に対する変化は、

$$E = \frac{R_0}{R} E_0 \quad (11.69.1)$$

ここで、 E_0 は、電離(堆積)領域の半径 R_0 における最大電界であり、 E は、爆発点から表面距離 R における最大電界である。地表上の観測点では、最大電界は、距離の増加とともに急速に減少する。§ 11.12で述べたように、 R_0 は、爆発威力に依存し、約2～5マイルであり、 E_0 は数Kv/mである。

高々度爆発

11.70 種々の爆発高度(HOB)における1～10MTの爆発に対する電離(堆積)領域の厚さと広さの半分を図-11.70 a、bに示す。横軸は、 θ 地点から地表に平

注：(3) 大気の密度がより小さく空気の原子や分子との衝突ひん度が少ない時の高々度では、
§ 2.143、§ 10.27で述べた磁力線に沿う電子 (β 粒子) のらせん運動が続く。

11.71 地磁気に沿って噴出しないうり、 γ 線と空気の分子や原子との電離(堆積)領域における相互作用の結果生じたコンプトン電子は、電界に沿う曲った経路をたどる⁽³⁾。このような運動によると、放射方向の3高々度では大気の密度が非常に小さく、空気の分子や原子との衝突が少く、電子 (β 粒子) 電界に沿う連続的な回折は、§ 2.143、§ 10.22のようにらせん状の動きとなる。加速を受け、時間とともに密度の変わる電子全体は、一致した電磁界放射が加わる。高々度爆発によるEMPは、中高度及び地表爆発における局地的非対称性から発生したEMPよりも高い周波数領域にある (§ 11.63)。

11.72 図-11.70 a、bの曲線は、電離(堆積)領域の大きさを表わすが、地表での範囲の広さを表わしてわいない。EMPは電離(堆積)領域から下の向へは全く放射されず、端から垂直に下方向以外の角度で放射される。従って、高い周波数のEMPによる地表での影響は、地平線(又は、爆発点から見た地表の正切点)までも広がる。しかし、低い周波数は、電磁波が地球の湾曲に沿うことができるので、地平線の向うまで広がる (§ 10.12参照)。表-11.72は、0地点から各爆発高度に対する正切点までの地表に沿う距離を示している。

表-11.72 各種の爆発高度における接点までの
地上距離

爆発高度(マイル)	接点への距離(マイル)
62	695
93	850
124	980
186	1,195
249	1,370
311	1,520

11.73 高々度爆発による地表での電界の最大値(及びその振幅)は、爆発威力と爆発高度と観測者の位置と、地磁気に対する方位とに依存する。しかし一般法則では、電界の強さは、EMP放射線を受ける範囲の殆んどで、数十KV/mと考

行に測った大気中の距離である。この曲線は爆発によるおよそのγ線放射と各密度（高度）における既知の空気の吸収係数から計算されている。距離の小さい即ち爆発点の直下の電離（堆積）領域は、γ線の強度が爆発点からの距離とともに減少するので、遠方より薄くなっている。下方に進むときは、γ線は空気密度が増加するところを通るので、その殆んどが約40～10マイルの間の高度の層に吸収される。

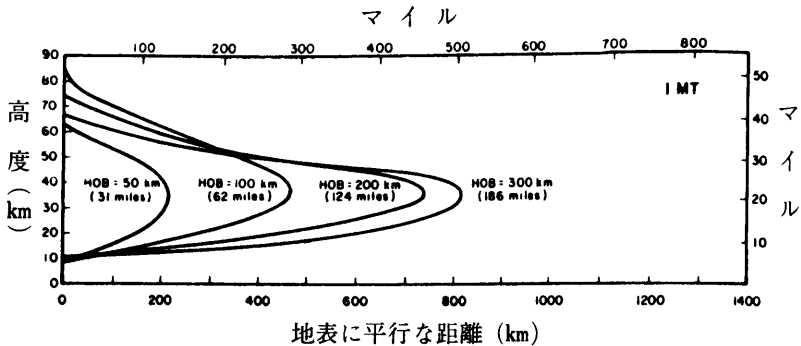


図-11.70 a 高度31、62、124及び186マイル1メガトンにおける電離領域

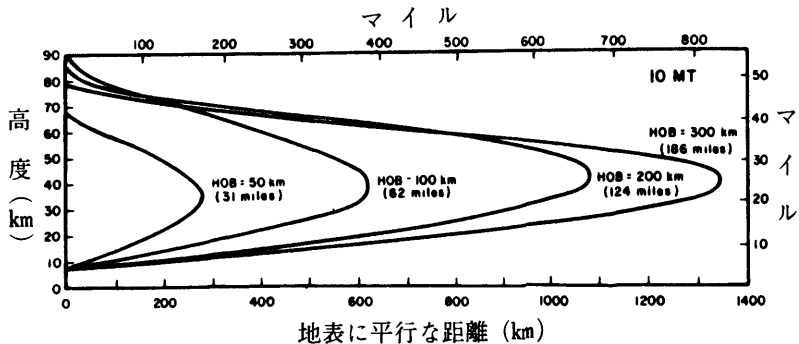


図-11.70 b 高度31、62、124及び186マイル10メガトンにおける電離領域

えられる。図-11.73は、数百K T程度の規模の、約60~320マイル高度での爆発に対する最大電界強度 E_{max} と、種々の E_{max} の分布を計算した等強線を示している。

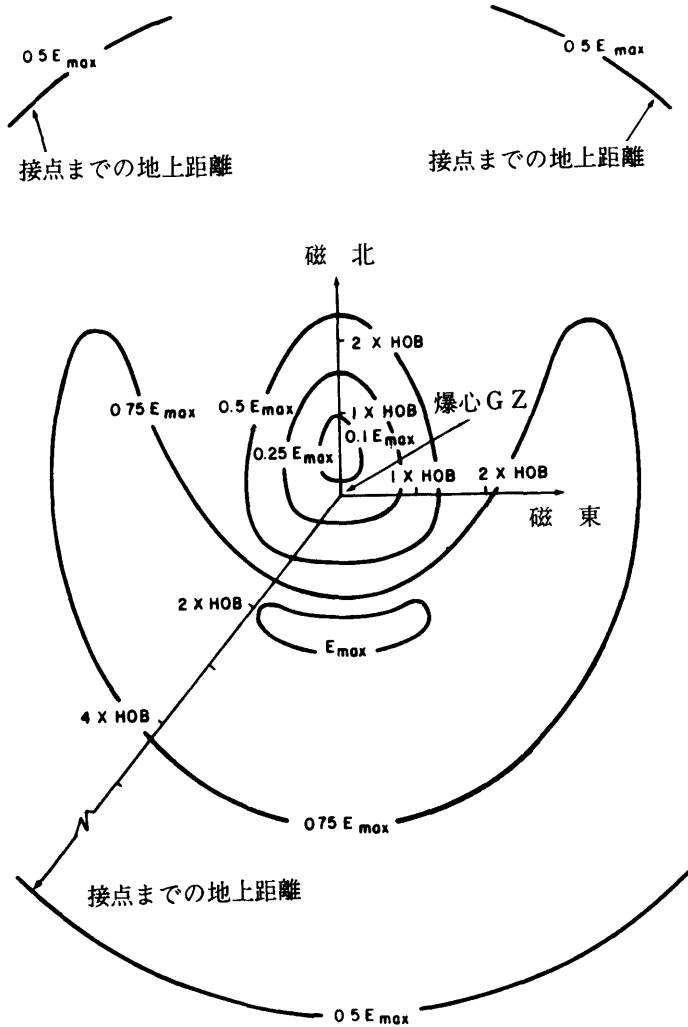


図-11.73 北緯30°と60°の間における高度60ないし320マイルでの爆発時の地表における電界強度（ピーク）の変化。データは出力数100K T或にはそれ以上に適用できる。

地表に沿って測った距離が“爆発高度”という言葉を用いて示してある。EMPの電界の空間的な分布は、地磁気に依存しており、緯度により変わる。図に示す結果は通常北緯 30° ～ 60° の間の0地点に対してあてはまる。赤道の南では磁北と東の表示は、南と西になる。図-11.13から、EMPにより影響を受ける範囲の殆んどにわたって地上の電界強度は、 $0.5E_{max}$ を超えることが明らかである。数百KT以下の規模では、地球の正切点での電界強度は、実質的に $0.5E_{max}$ 以下になるので、これは必ずしも正しくない。

11.74 図-11.73が約320マイル以上の高度に対して適用できない理由は、そのような高度では、直ちに正切領域が爆発高度の4倍以下になってしまうからである。HOBによる距離縮尺は、意味を持たなくなる。約320マイル以上の爆発高度においては、図-11.73と同じような等強線を、正切距離の何分の1かを使ってプロットすることができる。

11.75 EMPの電界強度の空間的な変化は、主に地磁気に対する方位と俯角、爆発点までの距離に関する幾何学的な要因によって起こる。図-11.73の爆心(GZ)地点の磁北方にある電界強度の低い領域は、水平方向に地磁気が侵入するためにできる。理論的には、コンプトン電子は磁界によって曲げられることなく、これに沿って真直ぐに運動するがこの領域の中央部には電界強度0となる点が存在し、電離(堆積)領域での発振のような、別の機構によって地表に弱いEMPを発生する。また、これと別に、電界強度の変化は、爆発点からの傾斜距離の差異により、地上での距離が延びることに起因して起こる。

11.76 図-11.73の等強線は、地磁気の俯角がおおよそ 50° ～ 70° にあたる。 E_{max} は爆発高度に対して余り大きくは変わらないが、最大電界強度の空間的な分布は、俯角によって変化する。大きな俯角、即ち約 60° 以上の高々度では、 E_{max} と $0.5E_{max}$ における等強線は、GZ地点を囲んでさらに一段と広がる。磁極(俯角 90°)上では、GZ地点の電界が0となるようなGZ地点を囲む一連の円になると理論的には考えられている。俯角が低いとき、即ち 30° 以下では、図-11.73で示したような、等強線がもっと円から遠ざかり広がる傾向が増すであろう。

参 照 文 献

- BLOCK, R., *et al.*, "EMP Seal Evaluation," Physics International Co., San Leandro, California, January 1971.
- BRIDGES, J. E., D. A. MILLER, and A. R. VALENTINO, "EMP Directory for Shelter Design," Illinois Institute of Technology Research Institute, Chicago, Illinois, April 1968.
- *BRIDGES, J. E., and J. WEYER, "EMP Threat and Countermeasures for Civil Defense Systems," Illinois Institute of Technology Research Institute, Chicago, Illinois, November 1968.
- Civil Defense, May 1971, TR-61-A.
- "EMP Protective Systems," Department of Defense/Office of Civil Defense, November 1971, TR-61-B.
- "EMP Protection for AM Radio Broadcast Stations," Department of Defense/Office of Civil Defense, May 1972, TR-61-C.
- FOSS, J. W., and R. W. MAYO, "Operation Survival," *Bell Laboratories Record*, January 1969, page 11.
- GILINSKY, V., and G. PEEBLES, "The Development of a Radio Signal from a Nuclear Explosion in the Atmosphere," *J. Geophys. Res.*, 73, 405 (1968).
- HIRSCH, F. G., and A. BRUNER, "Absence of Electromagnetic Pulse Effects on Monkeys and Dogs," *J. Occupational Medicine*, 14, 380 (1972).
- KARZAS, W. J. and R. LATTER, "Detection of Electromagnetic Radiation from Nuclear Explosions in Space," *Phys. Rev.* 137, B1369 (1965).
- LENNOX, C. R., "Experimental Results of Testing Resistors Under Pulse Conditions," Electrical Standards Division 2412, Sandia Laboratory, Albuquerque, New Mexico, November 1967.
- *"Electromagnetic Pulse Problems in Civilian Power and Communications," Summary of a seminar held at Oak Ridge National Laboratory, August 1969, sponsored by the U.S. Atomic Energy Commission and the Department of Defense/Office of Civil Defense.
- "Electromagnetic Pulse Sensor and Simulation Notes, Volumes 1-10," Air Force Weapons Laboratory, April 1967 through 1972, AFWL EMP 1-1 through 1-10.
- "EMP Protection for Emergency Operating Centers," Department of Defense/Office of
- trical Standards Division 2412, Sandia Laboratory, Albuquerque, New Mexico, November 1967.
- MINDEL, I. N., Program Coordinator, "DNA EMP Awareness Course Notes," 2nd ed., Illinois Institute of Technology Research Institute, Chicago, Illinois, August 1973, DNA 2772T.
- *NELSON, D. B., "Effects of Nuclear EMP on AM Broadcast Stations in the Emergency Broadcast System," Oak Ridge National Laboratory, July 1971, ORNL-TM-2830.
- NELSON, D. B., "EMP Impact on U.S. Defenses," *Survive*, 2, No. 6, 2 (1969).
- NELSON, D. B., "A Program to Counter Effects of Nuclear EMP in Commercial Power Systems," Oak Ridge National Laboratory, October 1972, ORNL-TM-3552.
- RICKETTS, L. W., *et al.*, "EMP Radiation and Protective Techniques," Wiley-Interscience, 1976.
- *SARGIS, D. A., *et al.*, "Late Time Source for Close-In EMP," Science Applications, La Jolla, California, August 1972, DNA 3064F, SAI-72-556-L-J.

HP『海軍砲術学校』公開資料

<http://navgunschl.sakura.ne.jp/>