

惑星地球の磁気圏内の放射線帯における諸現象の解明のために

Physical Processes in Radiation Belts in Magnetosphere of the Planet Earth

中 村 重 久

Shigehisa Nakamura

平成22年3月1日
2010 March 1

地球磁気圏内の放射線帯における諸現象の解明のために

中村重久

概要 地球磁気圏内の放射線帯における現象には、地球規模のものとそれより大規模なものがある。とくに、プラズマ波に関連した問題について、現在、なお、未知の諸問題が残されている。磁気嵐、オーロラ、などの諸問題が、太陽風および宇宙線との関連において理解が進んでいる。ここでは、とくに、NASA などにおける関連研究の成果をもとにして、その要点を述べた。これによって、今後の研究の方向を知るための参考となればよいと考えている。

1. 緒言

地球に磁気があることは古くから知られ、記述として残されている例もある。京都大学から米国にわたり電離層の研究の発展に寄与した **Sadami Matsusita** によれば、日本書紀には、すでに、オーロラ(**Aurora**)についての記述があるとしている。地球の磁気の効果は、磁針が南北を示すという特徴にあって、中国では、位置および方位を知るために利用され、“指南車”という名称で、ひろく活用された時代があった。ところで、地球をひとつの磁石としてとらえ、地磁気についての科学研究の道を開いたのはヨーロッパの科学者であったのではないだろうか。たとえば、**Norwegian Polar Expedition** という著書は、**Birkeland** によって、第1次の国際極観測年としての **IPY(1882-1883)** における北極圏における観測調査(**Aurora boreales** を含む)の結果をもとにして得られた研究成果をとりまとめたものである。さらに、それに続いて実施された、第2次の **IPY** は、ヨーロッパ中心の企画ではなくて、世界中の主要国の参加のもとで、発足、**1932-1933** 年に実施された。その観測成果によって、京都大学では、世界中の地磁気変動記録のデータの調和解析による研究の成果によって、地球表面に、太陽日周地磁気変動(**Sq**)に対応した電流系がある可能性を示し、**広野求和(1957)**は **Dynamo-model** を発表した。**Sydney Chapman(1940)**は太陽日周地磁気変動の理論が現実の現象において認められることを示した。

現在では **IGY** として知られている国際地球観測年(**1957-1958**)においては、欧米諸国とともに日本も観測研究にたずさわった。それに先立つ国際的企画会議においては、日本からは、**永田武**が出席し、南極観測事業参画にも強力な発言をし、昭和基地の位置が割り当てられた。日本の第1次越冬隊の隊長には、**西堀栄三郎**があたり、**北村泰一**隊員は、日本最初の南極域の **Aurora Australis** 観測をした。**前田憲一**による電波傳播における電離層の効果に関する研究は、電波による通信の範囲を全世界にわたって可能なことを明らかにした。

その後、地磁気の研究では、地球を、簡単な **dipole** としてみることができないことが明らかになってきた。それまでの、電磁気学における **Maxwell** の方程式では十分ではないことも判明した。**Elsasser** の電磁流体力学の理論があらわれ、その一方で、**Alfven** によって展開された宇宙電磁気学が認められ、**Van Allen** 帯の発見もあった。また、地球磁場に対する太陽風の影響の評価も、観測結果と理論による検討によって可能となった。強烈な磁気嵐の場合には、日周変動地磁気とは異なった磁場の変動が現れた。北極圏の **Aurora Oval** においては、**Aurora** の変動が顕著な時には地磁気変動の激しい磁気嵐の時と対応していることも明らかとなった。さらに、太陽活動と地磁気変動とは、太陽表面の **Corona** および **Burst** という現象と対応関係が存在することも認められた。ここに、磁気圏 **Magnetopause** の存在およびその周辺の **Solar plasma** の挙動についての **Model** もはっきりとしてきた。

とくに、**Aurora Oval** において出現する **Aurora** は、当初、太陽風による荷電粒子の流れが地球に降り注ぐときに認められると表現されたが、さらに、議論がすすめられ、詳細のわたる研究が重ねられている。とくに、**Alfven** と **Akasofu** の議論では、可視光として認められる **Aurora** は、地球磁気圏内でも、**Radiation belt** (放射線帯)ではなくて、その放射線帯の外郭

に沿って侵入し、地球の上層大気を構成する元素および分子と衝突し、エネルギーを放出することによると説明されている。太陽風は、それが、荷電粒子のほか、各種の放射線(高エネルギーの放射線を含む)、あるいは、雲状の Plasma によって構成されている[1]。このようなことについての知見も、たとえば、Sydney Chapman(1940)が紹介しているように、これまでの長い期間の研究の成果によるものと考えなくてはならない。今後、将来において、これまでに、未知のままになっていた諸問題についての究明が、さらに、一層、進展したものとなることを期待しなくてはならない。その結果として、人類の知的財産の蓄積とともに、人間社会の生活活動に繁栄がもたらされることを希望したい。

2. 地球磁気圏内の放射線帯

地球磁気圏は、太陽風の地球磁場に及ぼす影響として認められるが、放射線帯の内部の詳細については、従来、きわめて限られた観測データと理論的なモデルによる推定とを根拠として、獲得された情報であった。人工衛星が多数打ち上げられ、現在では、人工衛星を利用した情報が、GPS などのように、ひろく社会生活にも利用されている。

それでも、宇宙には、まだ、未知の部分が残されている。自然科学の道のさきには、その未知の部分を知ることがある。技術あるいは工学的研究では、自然から学んだ知見を人類の繁栄のために利用するという道の上にある。

いずれにしても、自然を対象として、研究を推進していくかぎり、相互の連携も必要である。

さて、ここで、本文では、地球磁気圏内の放射線帯内部に認められる現象について、要点を、簡単に述べてみたい。簡単にということが、“わかりやすい”とうことであれば幸いである。

丁寧に述べるとすると、一般的なことから説明をして、詳細な計算やデータも紹介しなくてはならないが、それは、関連の出版物および論文などの文献によることである。

米国においては、ミシガン大学の Michael W.Liemohn およびテキサス州のライス大学所属の Anthony A.Chan が、2007 年に、地球磁気圏の内側にある放射線帯における現象についての問題点を述べている[2]。

工学的技術が進歩し、学会などの団体および科学者の多数が惑星地球を周回する人工衛星を高度に利用するようになり、また、世界中をみわたしても、宇宙開発事業関連組織の多くは、月や火星へひとびとが容易に行けるような路を開くにはどのようにするとよいかを検討中の様子である。それでも、地球の外側から地球の上層大気の状態を見ることは容易ではないということも現実的に事実であることを認めざるを得ない。

この 2010 年現在では、地上およそ 400km には宇宙ステーションが建設中であり、一部の完成した部分は国際的な宇宙研究の目的で利用されている。そのための研究者および技術者の輸送および交替には、すでに、地球上と宇宙ステーション間で、国際的な有人宇宙航空機が運用されている。その意味では、2007 年以後の新しい情報をあわせて考慮しなくてはならない。

いずれにしても、人工衛星および有人航空機の運用が円滑にできるためには、地球のはるか上空に存在する“Van Allen Belt”(放射線帯)を人工衛星や航空機が無事に通過できることが必要なことである。この放射線帯は、最近までの情報によれば、赤道上空を取巻く二重環状帯となっていて、たとえば、外部環状帯および内部環状帯と称することができる。この二重構造の放射線帯に取り込まれている高いエネルギーをもった荷電粒子は、宇宙の天候からみても、あるいは、地球上の生命に対して、有害なものであると判断され、宇宙環境としても望ましい存在ではない。したがって、そのような有害な荷電粒子が増加するようなことになれば、現在は正常に運行機能を果している人工衛星の構成している多くのシステムにおいて、外装の損壊あるいは電子回路内での誤作動の要因となる可能性が高くなる。したがって、ここで対象としている二重放射線帯の構成因子としての電子およびイオンの増減の時間的変動および増減の機構などの物理的な過程を、なんらかの手段によって、把握していかななくては、手遅れとなってしまう。この意味で、この把握がうまくできる方策を見出すことへの努力が強く求められる。

しかしながら、現在の地球上で研究している科学者から見れば、この二重放射線帯を通過し

てきた後の Plasma flux(プラズマ束)の複雑な挙動となる。すなはち、外部のひとつの放射線源からの Plasma flux そのものを調べているわけではなくて、放射線帯の影響をうけた Plasma flux を調査解析していることになるわけである。多くの要因が同時に作用するために、複雑な挙動の本来の姿が把握できにくい条件が揃いすぎている。複雑な挙動に内在する Plasma flux の減衰機構を探ることさえできない状態である。それに、ここでの対象である荷電粒子の速度が高速であるために、問題は、地域的分布の問題が簡単な問題ではなくなってしまう。問題は、全地球的な問題として、包括的な問題に置き換わってしまう。包括的な問題として、複雑性から目をそらすと、それを検討し、誘導される結果は、形式的にえられただけであって、とても、意味のある研究の成果とは言えない。

それでも、この複雑な挙動に着目して、力学の光を当てることによって、ここで考えている二重放射線帯を透過してきた Plasma flux の機構を、簡単な形式によって表示できる。たとえば、まず、最初に、イオンの問題として検討する。そのあとで、電子の問題として検討する。さらに、つぎには、このようにして得られた解としての物理的な過程から、放射線帯の影響の無いときの Plasma flux およびその Plasma flux の放射線帯内における減衰の過程の両者を考慮する。このようにして、放射線帯の影響のない Plasma flux と地磁気擾乱との対応が適切に表現できる方策を見出し、この方策の応用が物理的にどんな意味があるか評価するためには、どのようなことを考え、どのように対処しなくてはならないかを検討しなくてはならない。

3. 放射線帯内のプラズマ

地球を取巻いている放射線帯は、Plasma(プラズマ)の二重同心円状ドーナツ型である。ちなみに、これを模式的に図示すると、たとえば、Figure 1 のようになっている。この放射線帯は、Innere magnetosphere の磁気球状圏の不足分であると見做しても良いだろう。Inner magnetosphere の磁気球状圏の磁場は、かつて、放射線帯内の Plasma のすべてが磁気球状圏の一部であったころの古い dipole の形成する磁場を反映しているものと考えられる。ここで対象としている放射線帯のうち、内側の環状体は、地球上、700~10,000 km の高度にある。一方、外側の環状体は、その規模が大きくて、地球上、13,000~65,000km に範囲のひろがりがある。このふたつの環状体の、両者共に、宇宙線および太陽フレア(Solar flare)によって電離状態になった荷電粒子を内包している。とくに、後者の、Solar flare による荷電粒子は、時によって、Solar flare が原因となって誘起された強い地磁気嵐の結果としての荷電粒子が放射線帯内において変化する。

ふたつの放射線帯のいずれも、Spectrum を見るとき、エネルギーが最高位(MeV・の程度)に保たれているあいだ、Inner magnetosphere 内では、Plasmasphere および Ring current は、低エネルギー帯域の荷電粒子が量的に多く、しかも、同時に、Electron volt から KeV のような低エネルギー帯域内に共存している。Plasma sphere では、Inner sphere の Mass contents に富んでいる。そして、Ring current では、この領域のエネルギー成分に富んでいるということである。したがって、両者は、放射線帯の物理学を支配する上で特有の役割を果たしていたということになる。

放射線帯の荷電粒子動きはきわめて速い。外側の放射線帯の電子は、たとえば、数秒程度のあいだ出現する局所的磁場帯の周囲を縁を描くように巡る。電子は、行きつ戻りつを繰り返しながら、数秒後には、磁力線のベルトに沿って落ち込むように動いて捕捉されてしまう。最終的には、電子は、数分から数十分の間だけに限って認められる流れにのって、地球を回る東向きの流れとなって、放射線帯の磁場の形成する磁力線に沿って移動してゆく。ここに見たような三つの動きは、エネルギー保存系”Adiabatic”Invariant という形で数量的表現ができる[3]。

一般に、磁場の変化は電子の流れに比較して緩やかであり、粒子のエネルギーの増減が可逆的である。したがって、上述のような Adiabatic invariant の関係が成立することになるわけである。磁気嵐の場合には、Inner magnetospheric field は膨張し、粒子流路では外側に拡張する。これは、”Dst effect”の名称で知られている[4]。つまり、磁場の膨張は、磁気嵐の強さを

示す指数”Dst effect”に対応しているからである。この過程を見ると、Radiationbelt fluxes は予測可能なものであり、増減を反復する性質があり、磁気嵐の規模に対応した増加を示すことがわかる。

このことは、単なる過程としての問題にとどまらない。いくつかの Source terms がひとつになって放射線帯が大きくなるわけである。そして、これが小さくなるときには、放射線帯での Intensity が抑えられた状態になることになる。このような例における放射線源からのエネルギーの増減を収支バランスとして天秤にかけると、その特徴は、Figure 2 に示すように表示されることになる。この収支は常に一定というわけではない。Reeves[5]の示すところによれば、地磁気嵐のおよそ半分は Flux increase に起因しており、あとの半分は、Flux decrease と磁気嵐前の Flux intensity との間での分裂に費やされる。

上述のバランスに関連した事項は、Figure 2 の示されているようになっており、Large-scale reconfiguration of the magnetosphere にかかわるものである一方において、また、他方において、荷電粒子と Plasma waves との相互作用としてとらえられる(Magnetosphere における電場と磁場とによる振動現象)によるものとかかわりがあるものと考えられる。さらに、放射線帯内に存在するものとしては、電子と同時にエネルギーを持ったイオンがある。このようなことになる過程は、Figure 2 に示したように、異なった粒子それぞれについて、重要な課程であるといえる。このようなことの関連して、1950 年代には、電離層突抜け周波数、電離層嵐、Dawn chorus(暁の合唱)、Hiss(非常に高周波帯の振動)、あるいは、Whissler などについての、現象論的な情報は、地上観測記録をオッシロスコープによって再生する時点で、研究関係者では、すでに、ひろく知られていた。

ちなみに、Figure 2 に示された項目を以下に列挙してみる。すなはち、

RB Sources	V	RB Losses
-----		-----
Adiabatic effects		Adiabatic effects
SEP injections		Magntopause shadowing
CRAND ion trapping		EMIC waves
Substorm injections		Plasmaspheric hiss
Radial diffusion		Dayside VLF chorus
Nightside VLF chorus		V-----V
V-----V		

4. 地球規模の過程のスケール

放射線源の最も重要な例は、銀河系を起源とする放射線であり、それが、中性子を造り、この中性子が崩壊して陽子となったあとで Magnetosphere から飛び去ってしまう。この放射線源は、Cosmic ray albedo neutron decay(CRAND)の名で知られており、ほんの少量ではあっても、Inner zone の Ions に、常にその継続的供給に寄与しているものである。放射線帯のイオンに着目するとき、重要なもののうち、Sporadic なものが現われる Mechanism は、太陽表面の Solar flare からの Solar energetic particles(太陽エネルギー粒子)の Trapping(捕捉)にある。このような Ions が Magnetosphere(磁気圏)に到達すると、その周辺に存在する磁場のまわりで円形軌道を描く運動をする。この回転の半径 Gyroradius の軌道運動によって、磁気圏を突き抜けて放射線帯へイオンの一部が侵入することが可能である。このような現象は、しばしば、放射線帯におけるイオンの突発的増加とみなされることがある。

また、逆に、放射線帯のイオンは、磁気圏と惑星間空間との間にある境界 Magnetosphere から、惑星間空間へと飛び出すものもあると考えて差し支えない。このようなイオンの経路は、磁場のふくらむことによって広がることになり、Magnetopause に達するほどに大きくなることもある。その結果として、Dst 効果による Adiabatic かつ Reversible flux の減少は、放射線

帯からの荷電粒子が失われたものとして認められる。また、放射線帯のイオンの失われる別の要因としては、経路がはねかえりで変形がもとになり、その結果、荷電粒子は上層大気のさらに高密度の荷電粒子にぶつかることも考えられる。しかし、このような粒子の散乱過程は比較的ゆっくりしていて、**Magnetosphere** とのぶつかったときのような急激な荷電粒子の損失とは異なったものである。

また、放射線帯の荷電粒子は、すでに、**Magnetosphere** のスケールの大きさの影響を受けている。電子は、エネルギーを持ったイオンと同様に、**Dst** の影響を受ける運命にある。そのほかの、**Plasma sheet** からの強烈で突発的な粒子の流入などように、場のスケールが大きい場合には、場の効果は、**Electron source**(電子源)に認められることになる。

5. プラズマ波

以上に加えて考慮すべきものは、**Plasma waves**(プラズマ波)である。これは、電場および磁場の振動であり、荷電粒子と相互に影響を及ぼす。すなわち、放射線帯の荷電電子の分布においての、数時間から数日といった時間スケールの変化が現われるという現象に、この **Plasma waves** は重要なかわりがある。自然現象としては、このような現象が、いろいろ認められるために、放射線帯内の荷電電子の解析は複雑となり、たとえば、**Figure 3** の例で示されているような状態(cf. **Summer et al. [6]**)が、ここで考えているような状態であり、そのようなところでは、関連の **Plasma waves** は、放射線帯内の **Electron drift paths**(電子の流れに沿った経路)に対応して出現することになる。

いろいろの電磁波のうち、とくに重要なグループは、**ULF**(Ultra-low frequency)のおおきなスケールの振動である。この 1~10min 程度の周期帯において、**ULF** 波は、相対論的な電子の流動と共振作用を示すが、そのあいだに、この荷電粒子は空間的に拡散している。この荷電粒子の拡散は(数日といったような)比較的ゆっくりしたものであるが、相対論的電子には重要な意味をもっていて、強い **Storm** の拡散の時間スケールは数時間となることもありうるものと考えられる。

相対論的な電子は、それより周波数の高い帯域での **ULF** 波(周期:1~10 秒)とも共振しても不思議ではない。このような振動をひきおこす元は、環状流と **Plasmasphere** とが重なるようなところでの領域に存在している。ここでの必要な条件は、**Electromagnetic ion cyclotron (EMIC)**波が顕著に認められることである。ここで、**EMIC** 波は、放射線帯の電子の向きの運動に移行して、その経路が上層大気にまで達するようになることがあっても不思議ではない。この結果として、荷電粒子の損失は大きいと言えるが、局所的なものであるということになる。

極めて低い周波数帯(**ELF**; 3Hz~3KHz、あるいは、**VLF**; 3~30KHz)も、もちろん、相対論的電子との共振状態になることも考えられうることである。ここで考えた波は、いくつかの要因による影響を受けることになる。それは、波の位置および特性と関連している。たとえば、**VLF** 周波数帯の“**Chorus**”波は、その音が、小鳥のさえずりのようなところから名付けられたもので、それは、**Inner magnetosphere** において、新たに注入された **Plasma sheet electrons** によって発生するものであり、それは、**Inner magnetosphere** の **Dawnside**(暁側)から **Plasmasphere** の外側までの範囲を発生源としている。ここでの **Dawn** の **Night-side** が赤道域周辺になっていて、荷電粒子と相対論的電子との共振現象が、予想のとうり、エネルギーの拡散減少として出現することになる。このような結果となるまでに、放射線帯内部においての電子の加速作用のもとにおいて電子の流れとして認められうることになり、このような過程が顕れるまでは、**Outer zone** における相対論的電子の局所的な加速を主要要因として考えなくてはならない。個々で考えている **Dawn** の夜側においては、荷電粒子流は赤道に近い緯度に限定されており、荷電粒子と相対論的電子との共振相互作用は、エネルギー拡散過程の主要部分として現われると考えてよい。このような過程では、放射線帯内の電子の加速が電子流として認められることになるが、そのばあいには、**Outer zone** における相対論的電子の局所的加速が重要な要因と考えることになる。

また、Dawn の昼側帯においては、Chorus waves は magnetic equator から遥かに遠い位置にある。そして、そこでの相対論的電子は、運動の方向に向かったの拡散が優勢な状態となっている。また、EMIC 波の場合においても、同様なことであり、最終的に、電子は上層大気中に入って、勢いがくじけた状態となってしまう。したがって、これまでに考えた例とどのようなタイプの Plasma wave は、相対論的電子の発生源とも言えるし、また、失われる場所でもあるといえる。ただし、時と処によって、電子は、荷電粒子と相互作用を及ぼしあうことになる。

それに、Plasmasphere の内部には、ELF および VLF の周波数帯の Plasma waves が存在していて、Plasmaspheric hiss, Lightning-generated whistler, および、地上からの VLF 周波数帯のノイズ(雑音)としての現象が認められる。このような相対論的電子および Plasma waves との相互作用の拡散には指向性が認められ、したがって、Plasmasphere の内側に位置する放射線帯での荷電粒子が失われることになってしまうわけである。このような電磁波は、二つの放射線帯(内側および外側)の中間の Slot region という領域にかかわりがあり、これによって、外側放射線帯の領域の相対論的電子を、数日から数週間に取り除かれてしまう。

1950 年代の上層大気および電離層の研究において、地上観測に際し、ブラウン管オシロスコープなどによって、とらえられた現象には、すでに、Hiss および Whistler の現象は認められていたが、その詳細については、その後の研究の成果を待たなくてはならなかった。

6. 放射線帯の諸問題の概観

以上に述べた諸現象に関連して、いろいろの物理過程が認められるが、これらの諸過程が、相互に、どのようなつながりをもっているか、あるいは、放射線帯の消長にどのように係わっているのだろうか。実際に、現在の段階では、関連の科学者でさえも、十分な理解を持っているとはいいがたい状態にある。ここで、Figure 3 に図示した例に目を向けるとき、相対論的電子の力学は、Ring current, 放射線帯、その他の各種の波の相対的な位置関係に大きく関連があるものと判断されるので、今後、この問題が、どのような経過を経て、究明されるかについては、関連分野の研究者の注目に集まるところである。

ここで、とくに、太陽風関連の研究者は、これらの相互作用および効果についての究明に、先陣を争うような、熱烈な研究を推進している。たとえば、放射線帯にふくらみの変化があらわれるときには、拡散は外向きであるという傾向にあり、このとき、Plasma sphere が弱まるという傾向にある。このような過程が関連して、夜側の Chorus 波が Inner magnetosphere に認められることになるのである。このような現象として認められる効果は、Magnetosphere での Convection が認められる場合に明確になる。また、一方では、この Convection があるときには、Ring current も安定な状態に形成されており、磁場に影響を及ぼし、Dst 効果として認められ、あわせて、Magnetosphere shadowing が大きくなる。太陽嵐の時期の Ring current は、EMIC waves までも励起することになって、放射線帯が縮小の傾向となる。このような相反するような状態が現れるのは、磁気嵐が放射線帯においても認められるからであって、そのような時以外の場合には、そのような状況は現れない(たとえば、[5])。さらに複雑な問題として考慮すべきことは、放射線帯内での荷電粒子の動きが急速な周期であるということであるが、このことは、放射線帯の全体的な磁気の状態による効果であって、また、荷電粒子が、その経路上で Plasma waves と交じり合うことも関係している。

幸いなことに、多くの人工衛星による計測、および、信頼度の高くなった理論、そして、主要な過程を十分に予測できるようなモデルなどをもとにして、さらにモデルの改善へむけての鍵を手にすることができると期待がかかる。米国における今後の計画およびカナダによる外側放射線帯の研究のための人工衛星の計画など、今後の計画も、すでに予定され、準備されている段階にある。

本文では、米国でも、とくに、NASA の計画を中心とした最近の研究の方向が、どのような方向に向かっているかということを中心として、これまでに、あまり情報入手ができていない

研究などを紹介して、関連分野の研究者の参考に供することを意図したものである。

従来において、認められた、地磁気の研究のほか、電離層の研究成果の概要、そして、Plasma waves と荷電粒子とが二重放射線帯においてどのような物理現象につながっているかという問題点など、その概要の紹介も、あわせて、記述をした。

このような問題は、人工衛星の運用などの実用上の諸問題とも密接な関連があるけれども、同時に、現在も、なお、未知の部分も残されたままの状態にあると考えられる。

今後の研究の推進には、関連分野における技術的な側面における新しい発見および発明が、とくに要求されるものと考えられる。

7. 後記

放射線帯は、1950年代には、Van Allen が発見したということで、発見者の業績にちなんで、Van Allen 帯と名付けられ、Van Allen の理論の示す構造から、その構造は、地球をとりまく環状帯であり、環状帯の内部は、放射線のみが存在し、電子などは侵入することができない領域であると解釈されていた。

その後、とくに、Aurora に関連した研究進展途上で、Maxwell の方程式から発展して、Alfven の宇宙電磁力学があらわれた。また、Alfven の理論に束縛されて、Maxwell の方程式を基礎として誘導された数学的解析解に物理学上の意義があるとして、自然の中の実際の現象を正しく把握する努力が軽視されるという時期が、一時的とはいえ、現実には、認められた。

地球磁場および電離層の研究において、その後、継続された関連分野における観測研究によって、Whistler 現象や Hiss 現象も、観測事実として、研究者の間では、その起因についての議論が、長期間にわたり続けられたのも事実である。

それから、数十年の研究成果によって、Van Allen 帯の内部についての詳細な構造および放射線や電子などとの関連も明らかになってきている。しかし、ここで、本文の骨子を構成するために必要なものとして参考にした論文などは、すべて、1990年代に発表されたものであることから、その後の研究の成果を紹介する機会は、残念ながら、後日に期すということになってしまった。

この問題に関連しては、2010年現在、米国では、NASA(国立航空宇宙局)を中心とした大規模な事業の一部として、研究が推進されている。

参考文献

- [1] Chapman,S. 1964 Solar plasma, geomagnetism, and aurora, Gordon and Breach, N.Y., 141p.
- [2] Liemohn,M.W., and A.A.Chan Unraveling the causes of radiation belt enhancements, EOS (Transactions, American Geophysical Union), Vol.88, No.42, pp.425-426.
- [3] Roederer,J.G. 1970 Dynamics of geomagnetically trapped radiation, Vol.2, Springer, N.Y.
- [4] Kim,H.-J., and A.A.Chan 1997 Fully adiabatic changes in storm time relativistic electron fluxes, Journal of Geophysical Research, Vol.102, No.22, p.107.
- [5] Reeves,G.D. 1998 Relativistic electrons and magnetic storms: 1992-1995, Geophysical Research Letters, Vol.25, p.3265.
- [6] Summers,D.R., M.Thorne, and F.Xiao 1998 Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere, Journal of Geophysical Research, Vol.103, No.20, p.487.

添付図版

Figure 1 地球を中心とした二重構造の放射線帯における電子エネルギー束 (Ref.[2])

- (1) 電子エネルギー束の低いものから高いものまでを便宜的に
図化上の可視色の青いものから赤いものまでによって示す
- (2) 地球測位システム (GPS) 28 個の人工衛星のうち 3 個の
人工衛星の軌道を図示
- (3) 地球と同一の回転角速度で赤道面上を周回する衛星軌道図示
[by the courtesy of the USAF]
[Ref. M W.Liemohn and A.A.Chan; 2007]

Figure 2 省略 [本文中に挿入・参照]

Figure 3 相対論的電子の軌道(黒)と ULF 波、VLF 波、コーラス波(Chorus waves)、
電磁イオン・サイクロトロン(EMIC)波および、プラズマ圏のヒス(Hiss)
(by the courtesy of Summers et al., 1998; cf. Ref.[2])

注：実際には、3 次元的な表示とすべきであるが、参考図は 2 次元表示
(3 次元的空間の理解には、本文中の記述を参考とされるように)

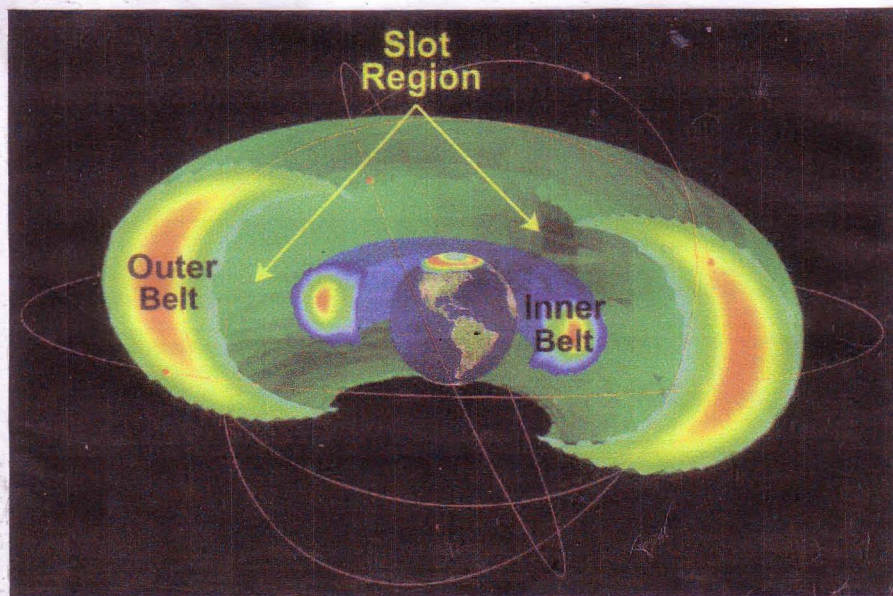


Figure 1 地球を中心とした二重構造の放射線帯における電子エネルギー束 (Ref.[2])

- (1) 電子エネルギー束の低いものから高いものまでを便宜的に図化上の可視色の青いものから赤いものまでによって示す
- (2) 地球測位システム (GPS) 28 個の人工衛星のうち 3 個の人工衛星の軌道を図示
- (3) 地球と同一の回転角速度で赤道面上を周回する衛星軌道図示
[by the courtesy of the USAF]
[Ref. M W.Liemohn and A.A.Chan; 2007]

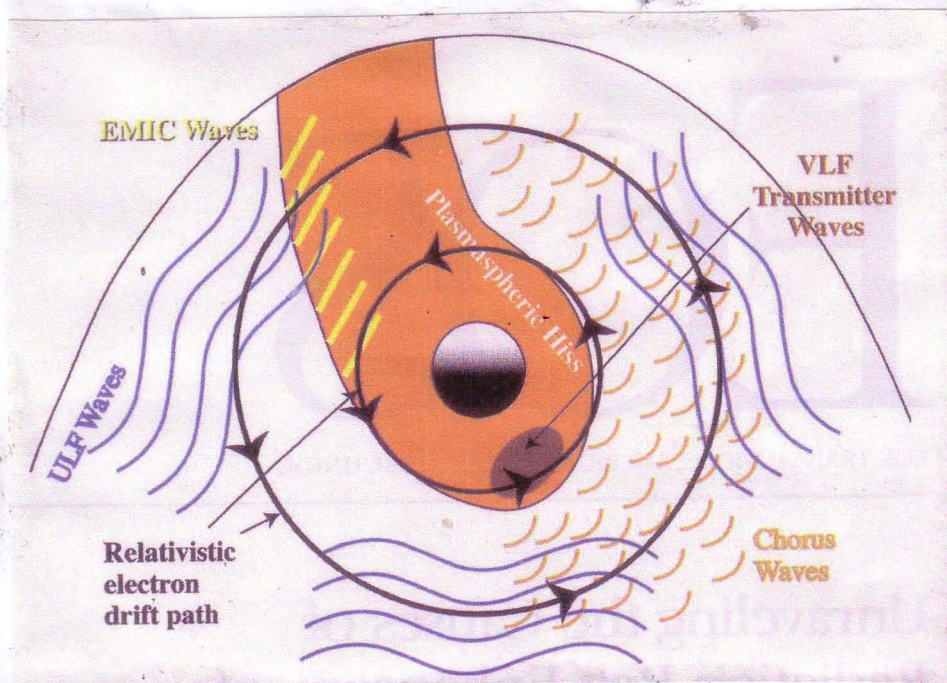


Figure 3 相対論的電子の軌道(黒)と ULF 波、VLF 波、コーラス波(Chorus waves)、電磁イオン・サイクロトロン(EMIC)波および、プラズマ圏のヒス(Hiss) (by the courtesy of Summers et al., 1998; cf. Ref.[2])

注：実際には、3次元的な表示とすべきであるが、参考図は2次元表示 (3次元的空間の理解には、本文中の記述を参考とされるように)

付録 地磁気嵐、オーロラ、太陽活動の相互関係について（概説）

中村重久

本文では、一般市民による最近の電波利用状況に加えて、地球の周辺の電波について述べ、さらに、太陽系を構成する惑星地球の理解のために、宇宙空間と自然現象についても述べる。とくに、太陽と地球との関係を、自然科学の側面からとらえて、これまでとは異なった地球観への道へと導く。すなわち、地球の磁気は、従来、南北を示す磁針で、ひろく知られているが、磁力をもった地球では、その磁気の強さは、一定であると見られてきている。しかしながら、地球全体について、詳細に調べると、地球の磁力も、たとえば、太陽活動の影響を受けて、24時間の周期で変動している。太陽活動が静穏なときには、静穏時太陽日周地磁気変動（Sq）がみとめられるが、太陽活動が活発になると、大気表面に認められるコロナあるいはバーストというような現象の影響は、太陽風とともに地球の周辺の到達し、地球上では、地磁気嵐、オーロラ嵐、電離層嵐となって、認められることになる。この地磁気嵐が強烈になると、上層大気の電離状態に異常な変化が発生し、オーロラの活発な動きにつながり、さらに、激しいときには、地上の電力送電に障害が発生して、企業および一般生活に必要な電力の供給停止という自体となることもある。通常の生活において、雷雲の接近や落雷による被害に比較してみても、さらに、はるかに広域で甚大な被害が発生した例は、過去において、実際に、専門的にみて、日本書紀にも、オーロラの記載があるとされており、米国の中緯度帯空においてオーロラが観測された例もある。極度の例では、通信網の機能が一時的に停止状態となった事実も報告にある。米国では、2010年現在、過去における科学的記録などの公表が実現され、科学者としても、そこには大変に興味深い資料などが含まれている。今後、さらに、資料の公開がされて、その活用が可能になるときが来るものと思われる。

1. はじめに

地球上では、電波は、日常生活では、必要不可欠なものとなってきた。宇宙には人工衛星や宇宙船やロケットが飛んでいて、電波の利用は、高度に発展している。これによって、人々は電波の長所を利用してきた。しかし、宇宙に、多くのロケットや人工衛星が打ち上げられ、その一部は、機能停止や、破損したまま、地球の上空を周回している。宇宙の“ごみ”が、宇宙の環境を汚しているといってもよい。それでも、宇宙の掃除は簡単ではない。それに、壊れた人工衛星の破片が、ほかの人工衛星や宇宙船に衝突することは、地球上の電波の利用の妨げとなる。それでは、その妨げをするものとして、人工的なもの以外に、自然界に、どのようなものが存在するであろうか。

ここでは、地球の上空にある電離層や人工衛星の軌道の周辺に帯状に放射線などが分布し広がっている空間の問題として電波のはたらきを考えることにしよう。このような空間は、1900年代後半に発見されていたもので、ヴァンアレン帯と称されることもある。自然現象としてのオーロラと人為的な核爆発実験との類似点について、簡単な実例を示す。

2. 電波の利用

現在の地球上では、各種の電波が飛び交っており、その電波の特徴を利用して、世界中の人々の活動が支えられているといってもよいであろう。最近の例では、宇宙船と地球上との間で、電波を利用して、画像の送受信ができ、交信できるようになった。宇宙船が地球の裏側であったとしても、交信は可能である。それは、地球上空にある電離層というイオンの密度が高い層に地上からの電波が反射するために、地球の裏側に、その電波が伝わるからである。現在では当然と思われることでも、その発見と発見から実用化までの経過は、多くの人々の努力の積上げであったことを忘れてはならない。ちなみに、1900年代には、電波が空中を伝わることを利用して、Marukoni(1897)が、Bologna 大学において、洋上の船舶と陸上の基地との間で通信ができることを発見したあと、1905年には、日本では、その無線電信を利用している。Bologna 大学の図書館の入口には、和製の衝立に、東郷の三笠艦上の図を入れて、その実用性を世界で最初に示したことの記念としている。その後の電波の利用の進展は顕著であり、海上のみならず、さらに、航空機の利用にも、電波が利用されることになった。また、市民生活においては、陸上では、携帯電話にも、自動車のナビゲーターにも、電波が利用されるようになった。日常生活に関連して、電波を利用した例として、自動車などの駐車場での出入口の開閉を、運転手が操作可能であるし、その他の多面的応用の範囲はかぎりなくひろくなった。

ところで、最近になって、このように便利な電波の利用に必要な道具が老朽化したり、その利用が高度になって、多くの人々への利益をもたらすとともに、それに伴った障害も無視することができない状態となってきた。

しかし、現在では、たとえば、このように便利な電波利用に密接な関連のある人工衛星が、多数になるにおよび、機能停止のまま地球を周回する状態も認められ、正常な機能で作動している人工衛星にとっては障害物となるおそれもある。

一般的な見地に立てば、いろいろのことを考慮して、電波利用に関連した事項のすべてを、調べて、障害のおそれのあるものを排除しなくてはならない。しかし、問題が、宇宙空間での問題であるときには、機能停止した人工衛星やロケットの破片は、宇宙空間の“ごみ”である。その“ごみ”を取り除くことは、容易ではない。その“ごみ”は、地球の上空を、そのまま、周回している。あるいは、その“ごみ”の一部が、地球上に落ちてくる可能性もある。いずれにしても、この“ごみ”の問題を考えることが必要になる。

ここでは、自然現象として、これまでに知られている現象を調べてみると、宇宙の“ごみ”問題と関連がありそうな現象も認められている。そのような現象について、ひとつの例を挙げ、説明することにした。この問題は、過去における人類にとって最も重要な問題とも関連しているものと判断される[1]。

3. 宇宙空間と自然現象

現在のところ、人工衛星は、地表面上、約 400km あるいは、800km といった高度を保って、地球を周回している。

最初の人工衛星は、地球の引力から脱出できるかどうかを確かめることが目的であったが、技術の進歩によって、有人人工衛星の試みも実現し、また、宇宙ステーションの構築を目指し、宇宙船に搭乗し、宇宙飛行士が、地球と宇宙ステーションとの間を、とびまわっている。

その宇宙ステーションは、地球の上空、高度約 400km を周回している。また、人工衛星は、地表上の高度約 800km を周回しているものもある。

ところで、電離層は、E 層、F1 層、F2 層などのほか、一時的に出現する Es 層もある。これらの高度は、たとえば、E 層は地表上約 100~200km（周波数帯は、1.5MHz~6.5MHz）であり、F1 層（周波数帯は、4MHz~5MHz）および F2 層（周波数帯は、3.5MHz~8MHz）は地表上約 400km~800 km である。一時的に電離層の周波数帯や高度が変化することがあるが、とくに、E 層の一時的に周波数帯が約 6MHz から 7MHz にまで変化する例は、Es 層と称している。これは、“スポラディック”の現象として知られている。地球上の上層大気中を伝わる電波は、周波数帯によっては、電離層で反射したり、突き抜けたりする。電離層の高度も変化する。そのため、電波を通信などに利用する場合には、安定した条件のもとで電波を送受信することが必要になる。

すでに述べたように、電離層は、地球上 100km からあるいは 800km のように、地表からの距離が大きい。そこでは、地表の大気圧に比較して、気圧が小さく、空気の組成成分も地表と異なっていて、それに、イオンの状態にある。つまり、イオンの状態の大気の層が電離状態というわけで“電離層”と称されることとなったわけである。電離層の電子およびイオンの密度は、E 層周辺（E 領域）と F1 層および F2 層（F 領域、または、F1 領域および F2 領域）とに特徴的な変化が、太陽活動の変化に対応して観測される。

地上から観測した電離層を、人工衛星によって観測すると、電離層の上空から地球へ発射した電波を利用するために、電離層の記録には、上層大気の影響が現れる。

大気は、太陽光放射の影響を強く受けるために、地方時にたいして、ほぼ一定のパターンが、それぞれの電離層に現れる。したがって、地球自転の効果によって、そのパターンが、地球の自転とともに移動しているように見えることになる。とくに、平常のばあいには、24 時間を周期とする変動成分が顕著である。これは、地磁気日周変動（Sq）によく対応していることが知られている。すなわち、上層大気のイオンは、太陽の影響によって、電離層内で、ある一定の流れのパターンを形成しているということである。

4. 太陽と地球

地球は、太陽系の惑星のひとつである。その惑星のうちで、水が存在し、生物が住んでいるというのは、地球のみである。最近、宇宙探査船を打ち上げて、惑星観測がされているが、それでも、地球以外の惑星と地球とは、表面を見ても、特徴が大きく異なっている。現在のところ、特徴の差異が、強調されて、研究報告されているように見える。いずれ、共通点についても、興味ある研究成果が発表されることになるであろう。

ところで、太陽と地球とに着目して、地球に対する太陽の影響を論ずることが通例である。太陽と地球の間には、水星と金星とがある。また、太陽からみて地球より遠くにある惑星は、木星、土星、天王星、海王星などである。冥王星は、天文学的には、太陽系ではないということになったが、星が無くなったわけではない。それに、小惑星や彗星など、限りがない。この太陽系以外については、天文学の分野でも、くわしく観測研究されている。最近までの研究によって、地球の形成は、現在から約 46 億年前であるとされ、さらに、宇宙の始まりは、約 150 億年と推定されており、ひとつのブラックホールのビッグバンがその起源であるとされている。

太陽は、太陽系惑星群の中心にあって、現在、水素とヘリウムとを主要な組成成分として、活発な核融合と核分裂とが繰返されている惑星であるとされている。天文学的には、太陽にも

寿命があつて、いずれ、将来は、星の仲間入りをすることとなると推定されている。

太陽表面からの電離粒子は、太陽風として認識されている。地球の周辺では、地球による磁気圏があるために、平常は、地球の磁場が太陽風から護られている。

5. 地磁気の日周変動

ここで、太陽と地球との関係のみに着目しよう。地球は、地磁気があつて、その地磁気は、地球内部の組成物質が高温高压の条件下で流動状態にあり、ひとつのダイナモを形成しているものと見做されている。当初は、棒磁石のような、簡単なダイポールのモデルであると言われてきたが、マクスウェルの方程式のみでは、十分な説明が困難となり、電磁流体力学の方程式による研究に焦点が移行してきている。それでも、観測事実は、実際の現象を示すものであり、人為的な事象とは別のものである。

平常の場合、地球内部に起因する磁場が主磁場として捉えられている。単純化した問題は、地球をダイポールとして考えると、形式的には、簡単である。球面座標を利用して、数学的な線形問題の固有値問題として、球関数表示による厳密解が得られることになる。地球内部構造を考慮して、電磁流体力学の方程式を解くことも、すでに、ひろく研究されている。

しかし、太陽の存在を考えると、ダイポールのモデルに、変動磁場の存在を考慮する必要が生ずる。そして、その変動磁場の主成分は、電離層に関連した上層大気中のイオンの運動であり、これは、電荷をもった太陽風の効果であるということになる。午前と午後とのパターンおよび昼間と夜間とのパターンの組合せは、この太陽風の効果が地球磁場に及んでいることを示している。

電磁流体力学が、1956年に、Elsasserによって発表され、当時の地球電磁気学の講義では、球関数で表示された固有値問題の解で、トロイダルパターンとポロイダルパターンとであらわされるもの(広野の解・1957)が、地磁気主磁場に対する地球内部の構造として紹介された。

地球の変動磁場については、これまでに 1882-1883 年に実施された第 1 次国際極地観測年 (IPY-1) の成果を踏まえて、当時における世界主要国の参加によって 1932-1933 年に実施された第 2 次国際極地観測年 (IPY-2) における観測成果の解析結果によって、地磁気日周変動が、地方時を基準にすると、一定のパターンが地球表面に現れるということが明らかになった。これには、京都大学の系統的な研究の貢献が関係していることは、当時の日本における地磁気の研究水準が、世界的にみて、先進的であったことを意味している[2]。この観測結果に関連する物理現象として、電離層の日周変動が対応することが確認され、地球磁気研究においては、これを、“静穏時の地磁気の日周変動 (S_q)”と呼んだ。

この静穏時の S_q 日周変動は、時間的に周期性のある関数を解としてもとめる問題であるとするれば、その理論的背景を明らかにするためには、線形電磁現象に関連した問題を、微分方程式系の問題として扱うことが必要になる。ここで、たとえば、マクスウェルの方程式を利用することにすれば、地球表面を球面座標によって表示することによって解を求めることが可能になる。すなはち、球面関数表示の解を固有値問題の解として求めればよいことになるので、線形問題としての解が得られる。

実際の自然現象は、一般に、線形問題で解決するわけではない。三次元空間の現象であり、しかも、時間による変動も無視できない。いろいろの要因が関連していて、それが、同時の変動にかかわっており、それに、それらの要因の相互作用も考慮する必要がある。このようなことにかんがみて、これまでの IPY の観測計画のあと、さらに、多くの情報を観測によって求めるために、国際地球観測年 IGY (1957-58) が企画立案され、欧米とともに、日本も、南極基地における観測事業に参加することになる。この南極観測では、日本で最初の南極のオーロラの観測も、西堀越冬隊長とともに北村泰一隊員によって実施となった。その後、日本からは、毎年、南極越冬観測隊が派遣され、観測研究が継続されている。これによって、未知の領域であった南極域における地球規模の諸現象についての情報が獲得できる状態となって、現在にいたっている。

6. 磁気嵐

太陽活動は、一般に、時々刻々、変動している。太陽活動の特徴は、太陽表面にあらわれる黒点に関連していることは、かなり古い時代から知られていたが、これについて、科学的研究が進められるようになるまでには、さらに、最近の関連分野における知見による検討をまたなくてはならない。

地磁気の変動が、突然、激しく大きな変化を示すことがある。このような例では、この変動を、磁気嵐と呼んでいる。この磁気嵐の原因は、太陽表面で認められる爆発的現象によるものと解釈され、太陽におけるバーストで発射された電離粒子の地球磁場への異常な侵入によるとみなされている。このような磁気嵐の場合には、地球上では、オーロラが観察される。

ところで、オーロラの問題では、主磁場以外に、電離層以上に強いエネルギーの影響を考慮なくてはならない。太陽と地球との中間には、磁気圏と称する領域があり、地球の磁場を取り囲むようなパターンとなっている。そのために、太陽風の影響は、地球の低緯度帯に直接到達することはない。地球の両極のオーロラ・オーヴァルの領域に限って、地球の磁力線に沿って、太陽からの電離粒子が高速で飛び込んでくる。この粒子群が大気と衝突して、大気中の分子を電離状態にし、また、ion の energy-level を高める作用をし、その結果として、オーロラの現象が現れることになる。すでに、Sydney Chapman and Bartels とが、1940 年に示しているように、Birkerand が室内の実験装置によってオーロラ再現を試みた例の結果によれば、2010 年現在の研究者が抱えている問題のポイントは、基本的に、彼の実験において指摘された問題点と共通しているといってもよいのではないだろうか。

もちろん、太陽風の風上側の磁気圏の存在は理論的にも説明されたが、風下側尾部のプラズマやダイナモのモデルの詳細まで、1940 年の時点で明確になっていたわけではないようである。ちなみに、Chapman が、気体分子運動論の数学的解を求めるに当たって、自ら定義した“Sonin-関数”は、後年、数学の分野では、sn 関数、cn 関数と、整理されている。線形理論で特異点が二箇所存在する球面上の問題の場合の厳密解を導くことには相当の労力を要したはずである[2]。

7. オーロラ

太陽面擾乱からの“Burst”の現象は、太陽黒点から飛び出すことがあるが、黒点ではない太陽表面から出ることもある。太陽面の擾乱は、太陽面から地球に向かって電離粒子を発射して地球磁場の“Aurora-oval”に位置する上層大気の電離状態に強く影響し、太陽風から飛んできた巨大な荷電粒子のエネルギーによって、大気中の気体分子を励起し、そのエネルギーのレベルが変化して、オーロラ固有の発光現象として捉えられることになる。地球物理学および天文学では、太陽面の爆発 (Dst) として、放出されるエネルギーのみに焦点をおいたが、観測データが蓄積されてくると、その詳細が明らかになり、地球上の現象と密接な関係があることが理解されるようになってきた。この問題については、松下貞視、杉浦正久の米国における研究活動が深く関係している。

オーロラに関しては、Alfven[3]の宇宙電磁力学の理論的記述のほか、Stoelmer[4]の現象論に重点をおいた記述などがある。北極側のオーロラを、“Aurora-boreales”と呼び、南極側のオーロラを、“Aurora-australis”と呼ぶ。

なお、オーロラの緑色は、UCLA(1932)における実験で、窒素 (N₂) と酸素 (O₂) の混合気体の永続する残光のなかに認められた[5]。また、太陽のバーストによると考えられる激しい磁気擾乱の際には、粒子のエネルギーと光のエネルギーとが認められ、光のエネルギーは、ガンマ線、X 線、紫外線、電波、ときには、可視光線として放出される。オーロラの大出現のときには、オーロラ・カーテンの上端は、1,000km にも達し、原子状酸素が発する濃い暗赤色を呈することも知られている。このようにオーロラの高度が極度に高い場合には、その光は、非常に遠方からも見る事ができる。したがって、普通よりもはるかに南方でもオーロラが見

一方、宇宙線は、電離粒子とは異なる挙動をすることが知られているから、その特性に留意して、ヴァンアレン帯の問題に対処することが必要である。

ここで述べるヴァンアレン帯は、地球の赤道上空を取巻く環状領域であり、そこでは、地球外部からの電離粒子は侵入できないものとされている[8]。

ヴァンアレン帯についての研究も、とくに、2008年現在、進展が顕著なところ認められる。その研究成果として、これまでに明確ではなかったヴァンアレン帯の3次元的な立体構造についての情報が公表されるようになってきた。

一方、これまでに実施された核爆発実験に関連した情報の一部が公表されるような時代になってきた。ちなみに、核反応においては、アルファ粒子、ベータ粒子、あるいは、ガンマ線の放出があり、このときに、極めて短時間で、莫大なエネルギーの放出という現象を引き起こす。このために、その周辺の気体分子は、電離状態となるために、その過程で発生した電離粒子のエネルギーレベルに大きな変化が認められることになる。この電離現象には、太陽面の爆発と同様な特徴があるといつてよい。

米国の物理学関連学会の定期刊行機関誌上で紹介された解説例では、太平洋の400km上空における核爆発実験によってハワイ上空および地上で異常な諸現象が認められたとしている。しかしながら、この現象の理解に十分な情報の提供はないので、ここで、詳細について議論することはできない。

ちなみに、上記に関連した解説の一部を、ここに引用すると、以下のようになる。すなはち、米国の1.4メガトン級核爆発実験が、1962年7月9日に実施された。これに関連して、実験計画では、ハワイ諸島は、安全圏に位置するとされていた。この核爆発実験においては、太平洋上（ジョンストン環礁）、上空400kmにおける爆発であったが、そこから1400kmの距離のハワイ諸島において、空の色が明るくなり、街路の灯火は消え、警報が発令され、送電停止の事態となるにいたった。

上述のような、核爆発実験によって、ハワイ上空の大気層にあらわれた明るさは、地球上の現象としてみれば、太陽面の擾乱によって惹き起こされた電離層での磁気嵐であるとも解釈ができる。この磁気嵐が激烈なものであれば、オーロラ現象にも擾乱があらわれ、地球の低緯度地域においても赤色のオーロラが観測されても不思議ではない。残念なことに、このことを、科学的に判断するために必要な情報が公表されていないので、この問題について、さらに詳細にわたる議論は、ここでは、不可能である。

さらに、解説では、以下のような記述をしている。その一部を示すと、つぎのようになる。すなはち、

“この核爆発によって生じたベータ粒子は、大気上限を突き破って外へと飛び出してしまった。また、高エネルギー粒子はヴァンアレン帯の内側の環状ベルトで飛び回るだけである。さらに、通信衛星に障害が認められ、運用中の人工衛星に損傷が顕れ、そして、機能停止の事態となってしまった。このような障害の影響が、核爆発による放射線によるとしてみると、その効果が減衰するまでには10年以上の時間が必要であろう。

このような予測外の事態が発生した事情がもとになって、1965年には、地球上および地下における核爆発実験は禁止されることとなったのである。

しかしながら、米国以外の国では、この核爆発実験の失敗を見て、いずれの国も核爆発実験を実施して、世界中の軍事活動も各国市民の安全も吹き飛ばしてしまうことになるだろう。

宇宙脱出用航空機を独自に持っていないとしても、核爆発実験を公表して、軍事的な優位性を誇示し、その障害は覆い隠してしまうであろう。

一部の機関で、2年くらい経過した頃に、科学的実験によって、放射帯の復帰を確認するという計画が用意されているようである。“

以上を要するに；

オーロラの現象を核実験で作り出すことができた例を紹介したことになるのであろうか。

核実験の禁止を、米国だけでなく、世界中のすべての国で、実行することが最善策であるという考えを捨てる恐れがあるということにならないように務めることが必要である。

米国の国内でも、ほんとうに、核実験計画の内容が理解されているのであろうか疑問である。

られることになる。

ちなみに、科学的な研究の時代になってから認められた例で最も大規模なものは、1958年2月11日の大磁気嵐のときに、オーロラ・オーヴァルに出現したオーロラは、ときどき、米国やカナダを越えて南に移動し、赤いオーロラがメキシコでも見られた(Akasofu, 1968)。

このようなオーロラの記述は、日本書記のほか、古文書のなかにも残されている。

科学的に確実な記録としては、以下のような実例がある。すなはち、低緯度でのオーロラは、

1. 1859年9月01日 ホノルル、
2. 1872年2月04日 ボンベイ、
3. 1909年9月25日 シンガポール、
4. 1921年5月13日 サモア
5. 1951年9月13/23日 メキシコ

などである。この現象の確実な予測については、まだ、十分に普及していないといってよい。

さらに、オーロラが、地上の人間社会にえいきょうを与えた例としては、以下の例がある。

1. 1958年2月10日 赤いオーロラが出現している間、カナダ北東部に一時的な停電、これは、ある変電所の遮断器が異常を起こしたためであった。
2. 1972年8月初め A) 激烈な地磁気擾乱の際、アメリカ中西部で生じた同軸ケーブル通信網の遮断があった。
B) カナダのマニトバ水力発電所からの報告によれば、ミネソタへ送っていた電気は、約1分間、164MWから44MWに減じ、その後、10~15分間は105MWから平均60MWに減じた。
C) ケベック水力発電所の報告では、過重負荷のためはなはだしい電力低下が起こったとのことである。
D) ニューファウンドランドおよびサスカチュワン(カナダ中西部)では電力のかなりひどい変動が起こった。
E) ブリテイッシュコロンビア水力発電所ではトランスのうちの1個が壊れた。

オーロラ科学者は、いまでは、太陽物理学者と協力して、防衛機構も含めて、電力会社と通信機関に正確な予報を送るために活躍している。諸種の光工学機器、電波機器、人工衛星搭載計測器を使用して、絶えず太陽を観測する世界的な太陽モニター(監視)組織ができている。具体的な予報を発信するのは、米国ではコロラド州ボルダーの国立海洋大気局(NOAA)、宇宙環境研究所、太陽活動予報センターである。

このように、オーロラはきわめて広範囲に影響を及ぼすため、世界中に、いくつかの研究所が設置されている。また、多数の研究所と大学でも、多数の科学者がオーロラ現象の研究をしている。

すでに、1980年代には、宇宙発電所設置計画がたてられ、地球から3万8千km離れたところが予定されている(cf. 地球の半径・6400km)。しかしながら、この種の発電所は、磁気圏の強烈なオーロラ電子線と熱いプラズマに浸されることになる。また、ときには、磁気圏を押しつぶすような状況の下で宇宙発電所を稼働させるには、さらに、進んだ関連分野の研究成果を経た上でなくては、安全運転の見通しは起らない[7]。

8. ヴァンアレン帯

太陽風は、陽子(約100電子ボルト)と電子(50電子ボルト)とで構成されたプラズマである。これに対して、太陽面爆発によって噴出されるプラズマ・ジェットの速さは、毎秒1000kmになることもあり、密度は 1cm^3 あたり50個程度(陽子も電子も同数)であるが、個数は、太陽風の場合の5倍である。

赤祖父によれば、オーロラを引起す電子ビームがヴァンアレン帯の外郭に沿って局地の上層大気中に突入するために、オーロラ・オーヴァルはヴァンアレン帯外郭が電離層と交わる曲線に一致するということを発見した。

国際的な視点からみれば、国連が、真剣に、この問題に指導的な対応をするべきである。

9. 最新の情報について

オーロラのみならず、地球磁気関連の諸問題は、いまでは、太陽・地球系の現象として議論される時代となってきた。多くの研究者による研究発表も、毎年、世界中の関連学会で認められる。新しい知見が、次々と、積上げられている。

ちなみに、関連問題の概観には、たとえば、総説[9]あるいは百科事典[10]を利用することも可能となっているが、出版の年次は新しいが、本文の記述内容は、それよりも数年前に完成された原稿と文献によっている。とりあえず参考とするには便利であろう。

10. 結言

以上、オーロラの核実験との関係を明らかにすることを目的として、先ず、オーロラ理解のために、その基礎知識としての、電波、宇宙空間、太陽について、要点を示した。つぎに、地球の磁場の問題として、主磁場、日周変動磁場、磁気嵐およびオーロラについて要点を示した。ヴァンアレン帯と核爆発実験とについての記述は、地球のオーロラ現象と対応して、上層大気のエネルギーレベルの励起の問題との関連問題として、その要点を述べた。この問題に関連した研究は日進月歩であるので、新しい情報に注目することが必要である。

参考文献

1. Charles Day 2008 Very low-frequency radio waves drain earth's inner radiation belt of satellite-killing electrons, *Physics Today*, Vol.61, No.8, pp.18-21.
2. Chapman,S., and Bartels,K. 1940 *Geomagnetism*, Oxford University Press, London.
3. Alfven,H. 1950 *Cosmic Electrodynamics*, Oxford University Press, London.
4. Stermer,C. 1955 *The polar aurora*, Oxford University Press, London.
5. Chapman,S. 1964 *Solar plasma, geomagnetism, and aurora*, Gordon and Breach, N.Y., 141p.
6. Akasofu,S.I., B.Fogle and B.Hawrwitz (eds.) 1968 Chapman, Eighty, from His Friends, *Atmosphere Research*, p.101.
7. Akasofu,S.I. 1981 *Aurora-Photographic Illustrations*, Aasakura Pub., Tokyo, 118p.
8. Liemohn,M.W., and A.A.Chan 2007 Unraveling the cause of radiation belt enhancements, *EOS(Transactions, American Geophysical Union)*, Vol.88, No.42, pp.425-426.
9. Kono,M.(eds.) 2007 *Treatise on Geophysics*, vol.5, geomagnetism, Elsevier, N.Y.
10. Gubbins,D., and E.Herrero-Brevera 2007 *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism*, Springer, Dordrecht, Netherland, 1054p.

著者(Author)－ 中村重久 (Shigehisa Nakamura, Dr.)

書名(Title)－ 地球磁気圏内の放射線帯における現象の解明のために
(An overview of processes in radiation belts in magnetopause of earth)

原稿完成－ 平成 22 年 3 月 1 日 (2010 March 1)

著者紹介－ 昭和 33 年 3 月 京都大学卒業[昭和 29 年入学]
平成 22 年 3 月 電磁気学アカデミー(米国ボストン・ケンブリッジ)
米国地球物理学研究連合
欧州地球科学研究連合

非売品(Not to be sold)-