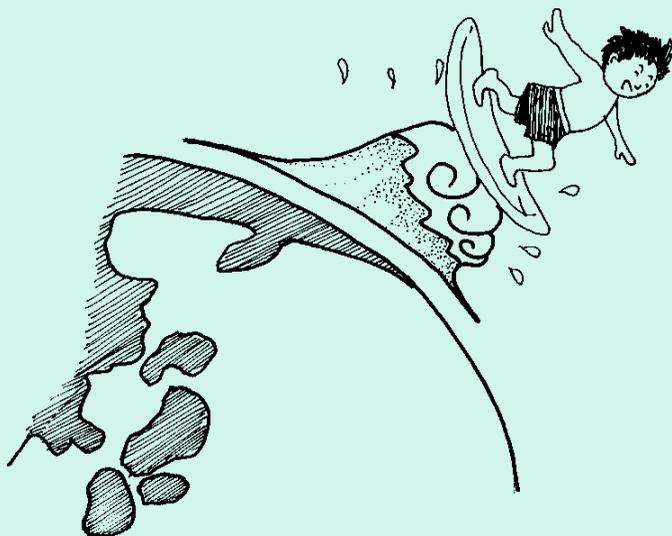


大気のでっぺん 50のなぜ

制作
名古屋大学太陽地球環境研究所
りくべつ宇宙地球科学館
豊川市ジオスペース館





皆さんは、子供の頃、青い空を見上げて、「この空の向こうには何があるのだろう」と考えたことはありませんか？ 空をどこまでも登っていくと、星に届くのでしょうか？ でも星は、世界でもっとも速く進む光でも、何年もかかってようやく届く遠いところにあります。その前に、空をどんどん登っていくと、まず大気のとっぺんに到着します。そこから先は宇宙です。

でも、大気のとっぺんとは、いったいなんなのでしょう？ そこは、大きな嵐が起こったり、オーロラが光ったりする不思議な世界なのです。この冊子は、「大気のとっぺん」に関する皆さんの疑問に答えようとするものです。



も く じ

1 章： 基本構造

※

1. どのくらいの高さまで空気があるの？
2. 大気のでっぺんの名前は？
3. 大気のでっぺんは暑い？ 寒い？
4. 大気のでっぺんの空気の成分は地上と同じ？
5. 酸素が地球から逃げ出している？
6. 大気はなくなるの？

2 章： 風と温度

※

7. 大気のでっぺんにはどんな風が吹いているの？
8. 大気のでっぺんにも潮の満ち引きがある？
9. 惑星波ってなに？
10. 大気重力波ってなに？
11. 何が大気重力波を起こしているの？
12. 大気重力波はどんな役割をしているの？

13. オーロラは大気のでっぺんを変える？
14. 火山が噴火すると大気のでっぺんにまで影響がある？
15. 大気のでっぺんにもオゾンがあるの？
16. 地球が温暖化すると大気のでっぺんも暑くなる？

3章： 光

- ・—————*—————・
17. 大気のでっぺんは光っている？
 18. どうして大気のでっぺんは光るの？
 19. 大気のでっぺんはどんな色で光っているの？
 20. オーロラや大気光はどこで光っているの？
 21. どうして地上では大気は光らないの？
 22. 地球は冠とベルトを持っている？
 23. 夜光雲ってなに？
 24. 流れ星はどうして光るの？
 25. 地球にもコロナがある？

4章： 電離圏

- ・—————*—————・
26. 電離圏ってなに？
 27. どうして電離圏ができるの？
 28. 電離圏に泡ができる？（プラズマバブル）
 29. 電離圏にかたまりができる？（極冠域パッチ）
 30. 電離圏がしましまになる？（中規模伝搬性電離圏擾乱^{じょうらん}）
 31. 電離圏を津波が伝わる？（大規模伝搬性電離圏擾乱^{じょうらん}）
 32. どうして電離圏には電流が流れているの？
 33. どうして電波は遠くまで伝わるの？
 34. スポラディックE層ってなに？

35. スポラディックE層のなぞって？
36. シンチレーションってなに？
37. 電離圏にも嵐があるの？

5章： 観測手法

38. 大気のとっぺんはどうやって調べる？
39. 大気のとっぺんまで行くことはできるの？
40. 光を使って大気のとっぺんを調べる？
41. レーザー光線を使って大気のとっぺんを調べる？
42. レーダーで電離圏を調べることができるの？
43. 流れ星を使って大気のとっぺんを調べることができるのはなぜ？
44. 宇宙からの電波を使ってオーロラの電離圏を調べることができるの？
45. カーナビで電離圏を調べることができるの？

6章： 人との関わり

46. なぜ大気のとっぺんを研究するの？
47. 電離圏でカーナビが狂う？
48. なぜ大気のとっぺんの高さが変わると人工衛星が壊れるの？
49. 大気のとっぺんは鉱夫のカナリア？
50. 大気のとっぺんには人が住んでいる？

1章： 基本構造



1. どのくらいの高さまで空気があるの？

地球の空気は、上に行けば行くほど、どんどん薄くなっていきますね。では、どこまで空気はあるのでしょうか？

地表面では、空気分子は1センチメートルの箱の中に2500京個（1京は1兆の1万倍）あります。一個一個の空気分子はとても小さくて軽いのですが、こんなにたくさんの空気分子が動けば、私たちはそれを風として感じることができます。

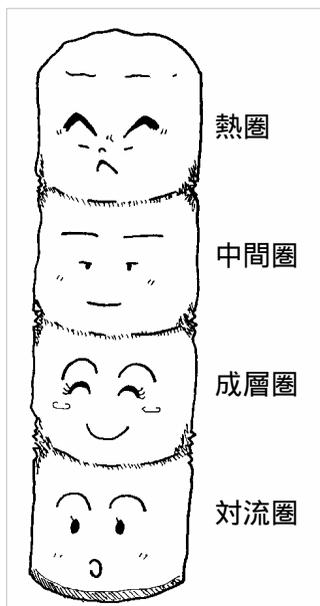
普通の人では息が苦しくて、酸素ボンベの助けがなければ行けないエベレストの山頂（高さ9 km）では、空気は地上の3分の1程度しかありません。高さ100 kmではこれが100万分の1になり、500 kmでは1兆分の1です。このくらいの高さでも空気分子はまだたくさんありますが、分子や原子は電気を帯びるようになって、普通の空気と違った性質を持つようになります。高さが100 kmから500 kmくらいが、地球の大気と宇宙空間の境目だと言えるでしょう。



2. 大気のでっぺんの名前は？

大気のでっぺんのあたりにはいくつかの呼び名があります。地表面から高さ 10 km くらいまでが、雲や台風が起きて、空気が良く混ざっている対流圏。10 - 50 km は、空気が上下方向にあまり動かず、きれいな層状の構造をしている成層圏。50 - 90 km は、対流圏と同じように空気が良く混ざるはずですが、詳しいことはよくわかっていない中間圏。90 km から上は、気温が高いため熱圏と呼ばれます。熱圏では、空気分子の一部が電気を帯びているので、電離圏、と呼ぶこともあります。

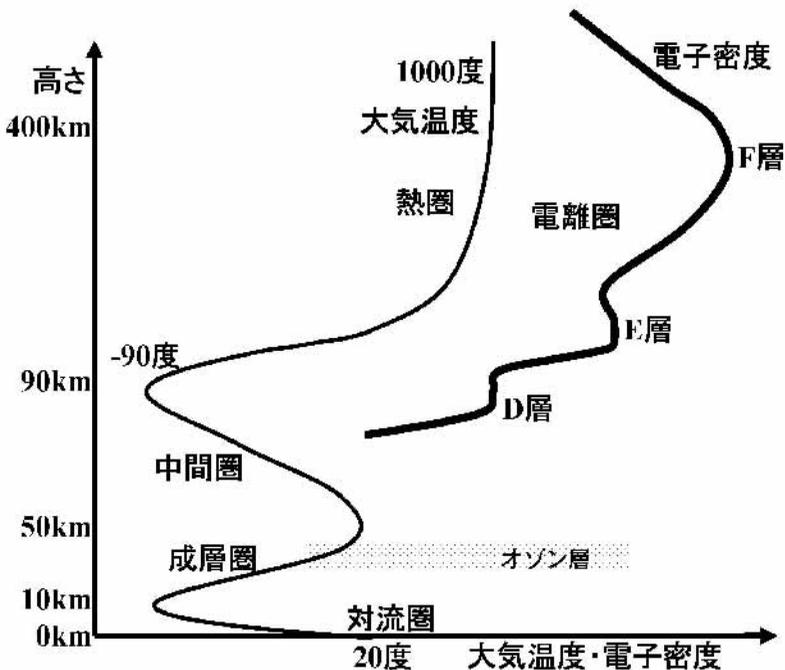
この本では、大気のでっぺんにあたる中間圏・熱圏・電離圏の「なぜ」をあつかうことにします。このような高い高度の大気はまとめて、「チョウコウソウタイキ」(超高層大気)と呼ばれています。



3. 大気のでっぺんは暑い？ 寒い？

皆さんは、高い山に登ると気温が低くなることを知っていますね。上へ行くほど気温が低くなるのは、対流圏の特徴です。これは、太陽光で地表面が暖められて、それが空気にも伝わっているため、高度が上がる（地表面から遠くなる）ほどどんどん気温が下がります。

高さ 10 km を超えて成層圏に入ると、空気の中にオゾンが含まれるようになります。オゾンは太陽からの紫外線を吸収して熱を出すので、いったん冷えた空気は、ここでまた暖められて温度



大気の温度構造とそれぞれの高さの名前。

が上がります。オゾン層の効果がなくなって、また空気が冷えるのが 50 km より上の中間圏。

高さ 80 - 90 km の中間圏の上端では、温度が摂氏 - 90 度くらいまで冷えます。ここは地球上で最も気温の低いところなのです。その上は熱圏で、オゾン以外の物質が紫外線を吸収して、大気は暖められ、温度は 1000 度にも達します。

1000 度といえば、とても暑い(熱い!)ように思いますが、実際には空気はかなり薄くなっているため、さわっても熱くはありません。この熱圏の温度は、昼夜の違いや太陽の活動によって 500 度から 2000 度以上まで、大きく変動しているのです。

4. 大気のとっぺんの空気の成分は地上と同じ？



私たちが住んでいる地上では、大気の成分は窒素分子と酸素分子がほとんどで、その割合は窒素分子が 80 パーセント、酸素分子が 20 パーセント。この成分は高さが 90 km の中間圏の上端くらいまでは同じですが、そこから上の熱圏では、酸素原子が大きな割合を占めるようになります。さらに 500 km より上ではヘリウムが、その上では水素原子が主成分になります。水素原子の重さを 1 とすると、ヘリウムは 2、酸素原子は 8、酸素分子が 16、窒素分子が 18。つまり、地球の空気は、重いものほど下の方に沈んでいるということです。

これらの主な成分の他に、成層圏や中間圏では、オゾンがごくわずかに含まれています。量は少ないのですが、オゾンは太陽からの紫外線を吸収して、まわりの大気を暖める作用をしています。

5. 酸素が地球から逃げ出している？

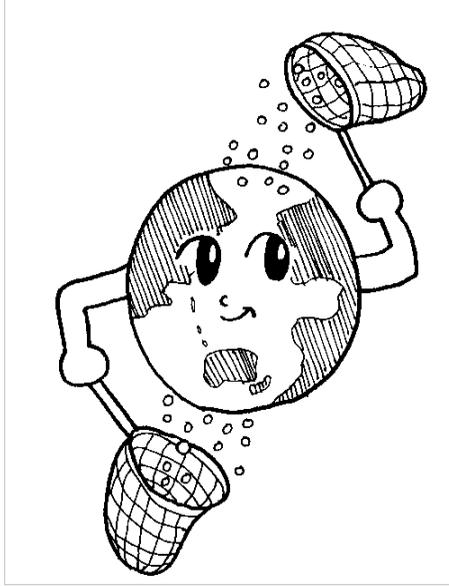
地球から酸素原子が逃げ出していることが、人工衛星やレーザーによる、最近の超高層大気の観測からわかってきています。これは特に極地方の上空に見られ、酸素原子がイオン化*して逃げ出しているのです、イオンアウトフローと呼ばれています。

その原因にはさまざまな説がありますが、オーロラにともなう電気的な力によるとする説が有力。宇宙からやってくる高エネルギーのプラズマ（電子やイオンといった電気を帯びた粒子）が極地方に飛びこみ、オーロラを起こしますが、それと共に超高層大気がエネルギーをもらい、その中の酸素原子の一部が電気を帯びて、上向きに加速されて逃げ出すというのです。でもこの「逃げ出し」現象の効率是一定ではなく、詳しい原因や実際どれだけ逃げ出しているのか、ということはまだよくわかりません。

* イオン化とは、酸素原子が、持っている電子のうち1つを何らかの原因で失って、プラスの電気を帯びることです。イオン化した酸素原子は、電気的な力を受けるようになります。



6. 大気はなくなるの？



極地方の上空から酸素原子が逃げ出しているなら、地球の大気はいつかなくなってしまうのでしょうか？

酸素原子が地球からどれくらいの割合で逃げ出しているかを見積もることはとても難しいのですが、少なくとも、人類が存続してこれからも生きていくような年月で、大気がなくなってしまうことはないでしょう。電気を帯びて地球から逃げ出した酸素原子は、地球の磁石の力につかまって、その一部分はまた地球に戻ってきています。地球の磁石の力は、このように大気が無くなるのを防ぐ役割を持っている可能性があります。

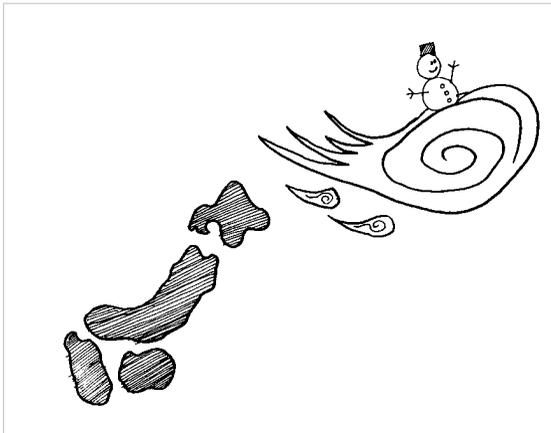
他の惑星ではどうでしょうか？ 火星は大気がほとんどないのですが、これは火星の重力が地球よりも弱いためであると思われます。金星は、地球と同じくらいの重力と濃密な大気を持っています。

2章： 風と温度

7. 大気のとっぺんにはどんな風が吹いているの？

超高層大気にも風が吹いています。風速は高くなるほど速くて、中間圏では数十 m / 秒、熱圏では 100 m / 秒以上。日本のような中緯度の中間圏では、成層圏と同じようにジェット気流が、夏は西向き、冬は東向きに吹いていて、その速さは 80 m / 秒に達します。台風の暴風圏が風速 25 m / 秒ですから、とんでもなく強い風だということがわかりますね。熱圏では、100 m / 秒の風が 1 日の間に向きを変えながら吹いています。また、高緯度地方では、オーロラなどの加熱により大気が膨張して、そこから 100 m / 秒以上の風が吹き出すことがあります。

これらの風の変動は、大気潮汐、惑星波、大気重力波などといくつかの種類に分類されています。風速は速いですが、大気の密度がとても薄いので、実際に超高層大気に行ったとしても、こういった風を肌で感じることはほとんどないでしょう。



8. 大気のでっぺんにも潮の満ち引きがある？

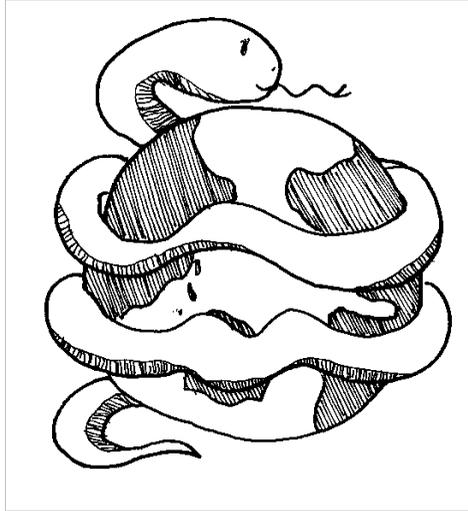
超高層の大気では、海と同じように潮の満ち引きがあります。

海の場合は、月と太陽の重力によって、海の水が1日に2回、増えたり減ったりします。超高層大気の潮の満ち引きは、月と太陽の重力ではなく、太陽の光によって大気が暖められることにより生じます。太陽の光が当たる昼間側は照らされて大気が膨張し、そのふくらんだ大気が夜側に向かって吹き出すのです。私たちは地球の上で、この昼から夜への吹き出しの中を1日に1周しますので、夕方では風が東向き（昼から夜）、朝は風が西向き（昼から夜）というように、1日かけて変化します。これを大気潮汐と呼びます。

さらにこの大気潮汐は、周期が24時間のものだけでなく、そこから分かれた12時間、8時間、6時間などのいくつかの周期に分かれて、超高層大気の複雑な風速変動を起こしているのです。



9. 惑星波ってなに？



地球の大きさと同じくらいのスケールの風の変動を、惑星波と呼ぶことがあります。例えば、中緯度のジェット気流は地球をぐるりと1周していますが、全く同じ緯度で吹いているのではなく、蛇のようにうねったりしています。また、地球を上から見た時に、ヨーロッパとアジアの上空に高気圧があって、シベリアとアメリカの上空に低気圧がある、というように、地球を1周するような大気のでこぼこも惑星波です。

地上の1点でこういった惑星波を観測すると、数日から数十日で風向きや温度が変わるので、惑星波は大気潮汐よりも周期の長い波と言えます。例えば日本の春に、三寒四温さんさんよんぬんといって暖かい日と寒い日が3 - 4日周期で移り変わるのも、惑星波の一種といえるでしょう。

10. 大気重力波ってなに？

数時間以下の比較的短い時間スケールの大気の振動を、大気重力波と呼びます。例えば入道雲がもくもくと登っていったり、山に対して風が吹き付けたりすると、その上空の大気は持ち上げられます。持ち上げられた大気は圧力が下がって膨張します。すると気温が下がるので、まわりの大気より重くなって落ちてきます。落ちてきた大気は、まわりの圧力が上がるために縮み、縮むことによって温度が上がってまわりより軽くなり、また上昇する、という振動を繰り返します。ちょうど水面の「浮き」のように、大気が上下に振動するのです。とても簡単に起きる振動なので発生しやすく、超高層大気には大気重力波が「充ち満ちている」と言えるでしょう。

振動を起こす力の中に地球の重力が含まれるので、「重力波」と呼ばれているのですが、宇宙論でブラックホールなどから伝わってくる「重力波」とは別のものです。



11. 何が大気重力波を起こしているの？



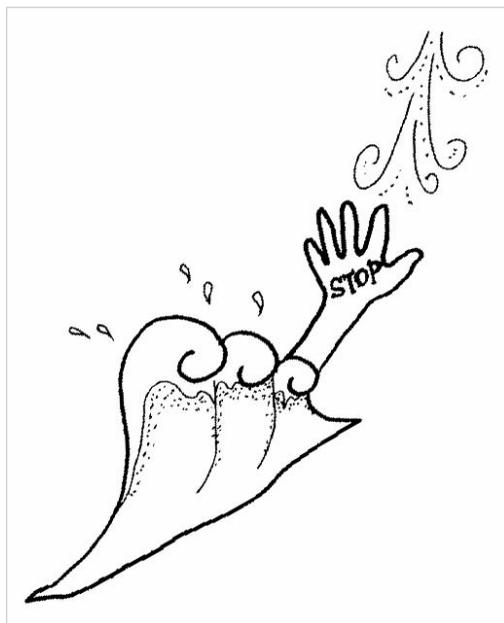
大気重力波は簡単な振動ですから、さまざまな大気の乱れで発生します。特に大気の乱れが起きやすいのが、地上から 10 km までの高さの対流圏。ここでは、雲や台風、高い山による風など、いつも大気は乱れています。こういった乱れは、高い高度まで大気重力波として伝わって行きますが、上に行くほど大気の密度が薄くなるので、重力波の振動の振れ幅はどんどん大きくなるのです。

下から伝わってきた大気重力波は、地球の大気中で最も温度が低い中間圏の上の端（高さ 90 km くらい）まで到達すると、そこで急激に壊れてしまいます。小さな波ほど壊れやすく、壊れる時に熱や力をまわりの大気に放出します。この中間圏の上の端は、波のバリアーのような役割を持っているのです。一部の大きなスケールの波はこのバリアーを超えて熱圏まで伝わりますが、このくらいの高さになると大気が薄くて、「すかすか」の状態になるので、大気の波は波として存在できなくなってくるのです。

12. 大気重力波はどんな役割をしているの？

大気重力波は、低いところから発生して上に伝わり、高度 90 km くらいの中間圏の上端で壊れて、熱や力をまわりの大気に放出します。この時に出す力は意外と大きく、中間圏の大規模な風系を変えてしまうほどの影響力を持っている、と考えられています。下から伝わってきた波が、中間圏で水平方向に吹いている風に対してざらざらした抵抗のような力となって、風を止めてしまうのです。

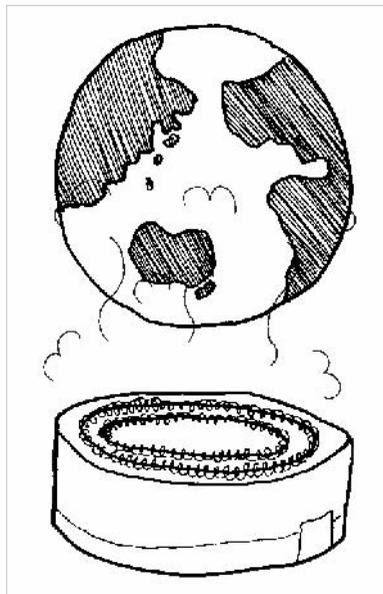
この大気重力波の果たす役割は、現在でもこの分野の研究者の大きな課題で、大型の気象レーダーや気球などによる観測やコンピュータを用いた数値実験が行われています。



13. オーロラは大気のでっぺんを変える？

オーロラは、宇宙空間から飛んできた高エネルギーのプラズマが、南極や北極付近の上空で大気にぶつかって、大気が光を出す現象です。

この時、大気は光を出すとともに、大きな熱エネルギーをプラズマからもらって温度が上昇します。特に熱圏では、温度が数百度も急に変わることがあります。温度が上がって膨張した熱圏の大気から、巨大な波が発生し、低緯度に向かって伝わっていく。日本でも、こうした現象がときどき観測されています。オーロラは超高層大気の温度を変えるだけでなく、地球規模の大規模な熱圏の風の吹き方までも変えてしまうということです。



14. 火山が噴火すると大気のでっぺんにまで影響がある？

大きな火山が噴火すると、その噴煙は時には対流圏を越えて成層圏や中間圏にも入っていくことがあります。1991年に起きたフィリピンのピナツボ火山の大噴火では、噴煙が徐々に中間圏にも入り込み、噴火の2年後には高さ80 - 100 kmの中間圏の温度が10度近くも上昇したことが、コロラド大学による観測から明らかにされています。こういった大きな火山の噴煙は、超高層の大気に入り込むとなかなか落ちてこず、何年にもわたって地球規模の環境変動に影響を与え続けます。



15. 大気のとっぺんにもオゾンがあるの？

オゾン層と言えば、成層圏の高さ 20 - 40 km にあることが知られていますが、それより高い中間圏や熱圏にもわずかにオゾンがあります。高度 50 km より上の中間圏のオゾンは、気球が到達できる高さを越えていて、測定することが非常に難しいのです。

この高さのオゾンは、ミリ波と呼ばれる長い波長の光を放射しているのです。この光を測定することにより、中間圏のオゾンを測ることができるようになってきました。名古屋大学太陽地球環境研究所でも、ミリ波を使って超高層大気のオゾンを地上から測定する装置を開発しています。この中間圏・熱圏のオゾンは、超高層大気で起こる大気成分の化学反応の多くの過程にかかわったり、大気光を光らせる(18を参照)際の仲立ちになったりするので、中間圏を調べる上で重要な役割を持っています。



チリ共和国の観測点にあるミリ波観測装置。

16. 地球が温暖化すると大気のとっぺんも暑くなる？



二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスが増えると、地球が温暖化されると言われています（「地球温暖化 50 のなぜ」を参照）。では地球が温暖化すると、大気のとっぺんも暑くなるのでしょうか？

答えは逆で、実は成層圏よりも上の大気は寒くなるのです。これは、地球温暖化のメカニズムを考えればすぐわかるでしょう。地上で排出された温室効果ガスが成層圏や中間圏に貯まると、地面からの反射光を吸収して、また地面にはねかえします。このために、熱が宇宙空間に逃げ出さなくなり、地上は暑くなるのです。しかし、温室効果ガスが存在する成層圏から上の高さでは、下からの熱をはねかえしてしまうために、熱が貯まらずに逆に寒くなるのです。「大気のとっぺん寒冷化」ですね。

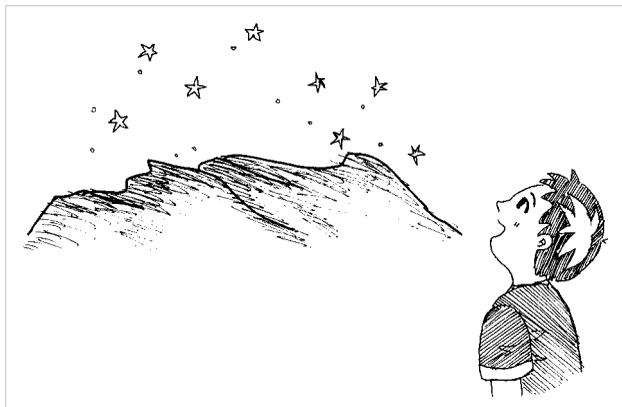


17. 大気のとっぺんは光っている？

強度は弱いのですが、大気のとっぺんは光を出しています。オーロラや大気光と呼ばれる発光現象は、その代表的なもの。

オーロラは目で見えるので、皆さんご存じでしょう。大気光はオーロラの100分の1から1000分の1くらいの明るさで、ほとんど目には見えないのですが、昔から「星明かり」といった言葉で表現されている光です。まだ電灯などが無かった時代、夜は真っ暗だったはずですが、そういう中でも、例えば山の稜線が夜にくっきりと見えることなどから、空が光っていることを昔の人は知っていました。

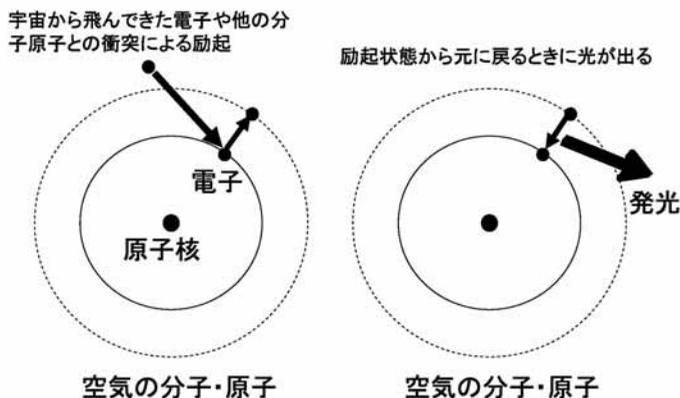
オーロラは極域でしか光りませんが、大気光は日本のような中緯度や赤道など、地球のどこでも光っているのです。



18. どうして大気のとっぺんは光るの？

オーロラや大気光はどうして光っているのでしょうか？ 光を出しているのは、中間圏や熱圏に存在する大気の原子や分子。代表的なものは酸素原子、酸素分子、水酸(OH)分子、ナトリウム原子、窒素分子などで、こういった原子や分子は、原子核のまわりを電子が回っている構造をしています。まわりの電子が、外から何らかの原因でエネルギーをもらうと、原子核からより遠いところを回るようになります。これを励起状態と言います。励起状態の電子は不安定なので、元の位置に自然に戻っていくのですが、その時、そのエネルギーの差の分だけ、光を出すのです。

オーロラの場合は、宇宙空間から飛んできたプラズマが大気の原子や分子に衝突することによって、大気が励起状態になります。大気光の場合は、主に昼間の太陽紫外線をエネルギー源としています。この太陽紫外線のエネルギーは、さまざまな大気分子・原子の励起状態として大気中に蓄えられているので、大気光は夜でもわずかに光ることができるのです。



大気分子・原子のまわりを回る電子が励起状態(点線)から戻る時に光が出ます。

19. 大気のとっぺんはどんな色で光っているの？

18 に書きましたように、励起状態になった大気分子・原子が元の状態に戻る時に光が出るわけですが、出てくる光の色（波長）は、励起状態と元の状態のエネルギーの差によって決まります。ちょっと難しいですが、原子や分子は量子力学によって、決まったいくつかのエネルギー状態しか持つことができません。オーロラや大気光の光は、太陽光のように七色のすべての色（連続光）ではなく、決まった色（発光輝線と呼びます）しかないのです。

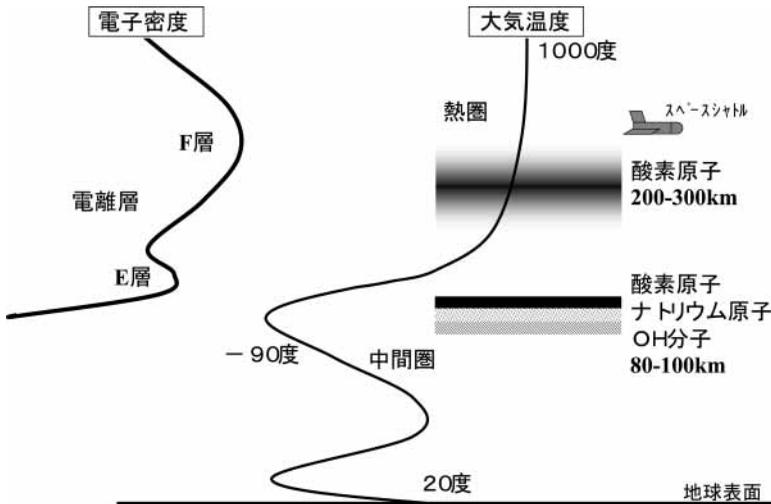
代表的な色としては、酸素原子が出す緑の光（波長 557.7 nm）と赤い光（630.0 nm）があります。水酸（OH）分子は赤外域の広い波長範囲にわたって数多くの発光輝線を持っており、バンド発光と呼ばれています。ナトリウム原子は、D 線と呼ばれる黄色の光（トンネルによくあるナトリウム燈の光）が中間圏でごくわずかに光っています。オーロラではこれらの色の他に、窒素分子による青やピンクの発光が有名ですね。



20. オーロラや大気光はどこで光っているの？

オーロラや大気光は、中間圏の上部から熱圏にかけて光を出しています。オーロラの場合は、宇宙空間からやってくるプラズマがその源です。このプラズマのエネルギーが高ければ高いほど、より低い高度で光ることになりますが、一番低いところはだいたい90 km くらい。高い方では、600 km くらいまでは光ることができます。あまり上に行くと光を出す大気自身が薄くなるので、光ることはできません。

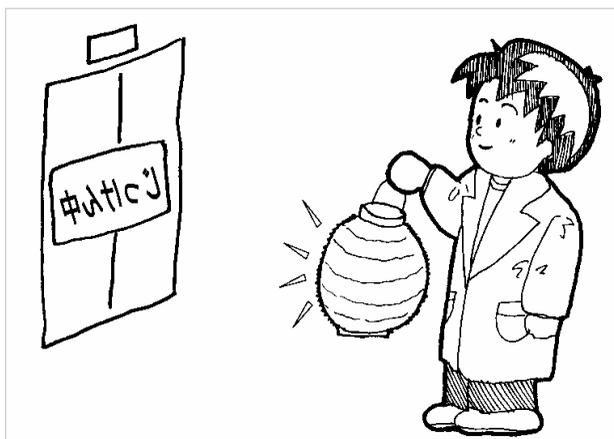
中低緯度で見られる大気光は、もう少し決まった高さで光っています。中間圏の上部付近にはいくつかの大気光の発光層があり、水酸(OH)分子(近赤外域、高さ80 - 90 km)、ナトリウム原子(黄色、高さ85 - 95 km)、酸素原子(緑、高さ90 - 100 km)などが光っています。また熱圏では、酸素原子(赤、高さ200 - 300 km)が光っています。スペースシャトルの飛んでいる高さが300 - 400 km ですから、同じような高さでごくわずかな大気が光を出しているというわけです。



21. どうして地上では大気は光らないの？

ではなぜオーロラや大気光は地上では光らず、中間圏や熱圏など、大気のでっぺん付近でしか光らないのでしょうか？

これらの光が出るのは、前述したように大気分子・原子が励起状態から元の状態に戻る時です。大気分子・原子が励起状態になってから光が出るまでの時間は、その状態によって異なりますが、たいていの場合、長い時間がかかります。例えば酸素原子の代表的な光である緑の光では、この時間が1秒、赤い光では100秒もかかります。しかし地上付近では、大気の密度が大きいために、大気分子どうしの衝突がとても頻繁に起こっており、励起状態の大気は、光を出す前に他の大気分子と衝突して、エネルギーを奪われてしまうのです。従って、大気が非常に薄くなって、他の



大気分子との衝突があまり起こらなくなる超高層の高さになってはじめて、大気は光ることができます。

励起から発光までに時間がかかるこれらの発光輝線は、空気を薄くした地上の実験室でも光らせることはほとんどできません。一方、オーロラの中で光る窒素分子イオンの光は、励起されてから光るまでの時間が 0.000001 秒以下と非常に短いので、実験室でも光らせることができます。しかし、実際にはオーロラは地上付近では光りません。これは、宇宙空間から降り込んで励起状態をつくるプラズマは、高さ 90 km よりも上で大気と衝突してしまい、それよりも低い高さに入ってこられないからです。

22. 地球は冠とベルトを持っている？



オーロラは北極や南極で光りますが、極地に行くほど光るわけではなく、極を中心として緯度 70 度くらいのところでベルト状に光ります。これをオーロラ帯と呼んでいます。一方大気光は、地球上のどこでも光っていますが、特に赤道をはさんで北緯 10 度と南緯 10 度付近にベルト状に明るくなっているところがあり、これは赤道異常帯と呼ばれています。赤道異常帯での大気光の明るさは、明るい時にはオーロラの 10 分の 1 程度にまでなります。

これらを宇宙空間から見ると、地球はオーロラ帯の冠と、赤道異常帯のベルトを持っているように見えるのです。

23. 夜光雲ってなに？

緯度の高いヨーロッパやカナダなどでは、夏の夕方に日が沈んでから、空に明るく輝く雲が現れることがあります。これが夜光雲です。

夜光雲は、高さが 80 km くらいの中間圏に、氷の粒が発生することによってできます。夕方、地上付近は日が沈んでしまっても、地球の丸みのために高さ 80 km にはまだ日が当たっている時に、この氷の粒が太陽光を反射して明るく輝くのです。通常の雲の高さはせいぜい 15 km くらいですから、夜光雲は非常に高いところにあることがわかるでしょう。

夜光雲が現れる、ということは、この高さの中間圏の温度が非常に低くなっていることを表しています。16 で述べたように、地球が温暖化すると中間圏は寒冷化すると予想されるので、夜光雲の現れる頻度を長期的に観測することも、地球の温暖化をモニターすることになるのです。



24. 流れ星はどうして光るの？

流れ星は、宇宙からやってきたチリや岩の固まり。これが大気と衝突する時に、大気光やオーロラと同じように、大気原子・分子や、流れ星自身の原子・分子を励起状態にして、そこから光が出てきます。これらの光を測定すると、流れ星の成分がわかることがあります。19 で、原子や分子は、決まった波長の発光輝線しか出さないことを説明しました。つまり、光の波長を測定すれば、光っている原子や分子を特定できるのです。

大きな流れ星は地表付近まで落ちてくることがありますが、たいていはもっと高いところで消えてしまいます。目では見えませんが、高さ70 - 100 km くらいの中間圏上部では、常に小さな流れ星がやってきており、ほとんどがこの高さで消えてしまいます。そういった意味でも、中間圏の上部は、地球大気と宇宙空間の境と言えるかもしれませんね。



注意：チリの固まりを投げて、流れ星にはなりません。

25. 地球にもコロナがある？

コロナというのは太陽の大気のこと。皆既日食の時に、完全に黒く隠れてしまった太陽のまわりに、太陽の大きさの何倍もの距離まで白く輝いて見えるのが、コロナです。

地球のまわりにも、「ジオコロナ」と呼ばれる輝く領域が、地球の倍の大きさくらいまで広がっています。もし火星人が地球の皆既「地」食を見たら、地球のまわりに輝くジオコロナを見つけるかもしれません。ジオコロナの正体は何だと思いませんか？ それは、地球のまわりに散らばっている水素原子が、太陽の光を散乱して光っているのです。

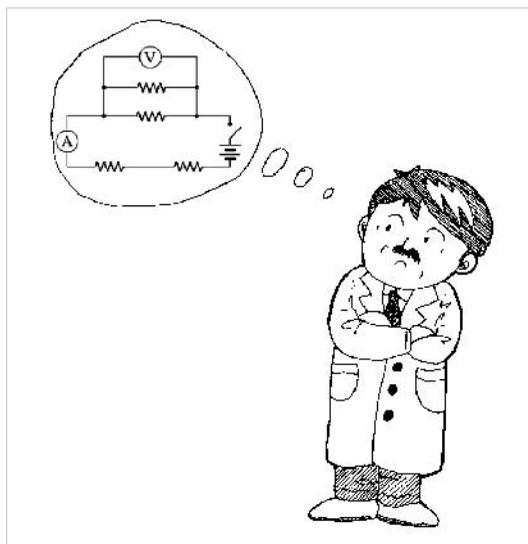




26. 電離圏ってなに？

高さが 100 km 以上になると大気は非常に薄くなって、一部の
大気は電気を帯びるようになります。この電気を帯びた大気は、
高さ 100 - 600 km 付近で地球をずっと取り巻いていて、電離
圏（または電離層）と呼ばれています。電離圏は、いくつかの層
状構造に分かれていて、代表的なものは、下から D 領域（60 -
90 km 付近）、E 領域（90 - 130 km）、F 領域（130 - 1000
km）と呼ばれています。

最も電子密度が高い F 領域では、1 立方センチメートルあたり、
昼間で 100 万個、夜でも 10 万個の電子（マイナス電気を帯び
た粒子）とイオン（プラス電気を帯びた粒子）が存在します。電
子の数がとても多いように思えますね。でも、同じ高さで電気を



帯びていない(中性の)粒子の数は、その1000倍くらいあるのです。電離圏と言っても、そこでは大気の1000個に1個が電気を帯びているに過ぎません。しかしこの電気を帯びた粒子は、電波を反射したり大気光を光らせたりして、地上からも測ることができます。

地上で測られる磁場の変化が、上空に電流が流れていると考えらうまく説明できることなどから、上空に電気を帯びた層があることは19世紀ころから想像されていました。20世紀に入ると、地上から出した電波が上空ではね返ってくることや、ロケットや人工衛星による直接的な観測によって、大気のとっぺんには電離圏があり、それが時々刻々と変化している様子がわかってきました。

27. どうして電離圏ができるの？

電離圏を作る大きな原因は太陽の光。特に太陽からの紫外線はエネルギーが高いので、大気分子・原子のまわりをまわる電子をはじきとばして、電子とイオンに分けてしまうことができます。これを電離と言い、電子やイオンのことをプラズマと呼びます。

地上でもこういったことは起きますが、大気の密度が非常に濃いので、電子とイオンに分かれた大気は、すぐに衝突して元の中性大気に戻ります(再結合と言います)。しかし大気のとっぺんの中間圏や熱圏では、大気の密度が薄くなっているため、衝突はそれほど頻繁には起こりません。プラスとマイナスに分かれた粒



子は、そのままの形で長い時間、存在することができるのです。これが電離圏です。D 領域、E 領域、F 領域など、異なる高さに層を持つのは、それぞれに電離を起こす太陽紫外線の波長が少しずつ違うため。

電離圏の形成は、紫外線による電離と、衝突による再結合のどちらが勝つかによります。太陽の光が当たっている昼間では電子密度が高く、日が沈むと、時間がたつにつれて、再結合によってだんだん電子密度が下がってきます。また、再結合の過程は大気の温度や風の吹き方によっても変わります。このように、電離圏は一定に存在するのではなく、いつもダイナミックに変化しています。これから説明するように、プラズマの泡、かたまり、しましま、津波といった、さまざまな構造ができています。

28. 電離圏に泡ができる？（プラズマバブル）

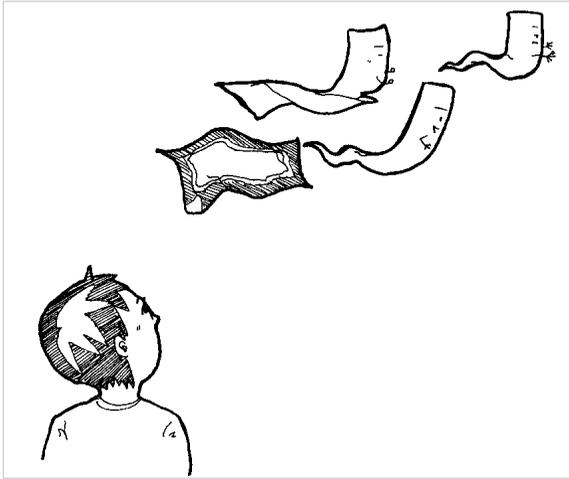
赤道域の電離圏では、夕方の日が沈む前後に、電離圏 F 領域に巨大な泡（バブル）ができることがあります。プラズマバブルです。プラズマバブルは、東西方向に数十 km - 数百 km、南北方向は数千 km にわたって、文字通り泡のように電離圏の電子密度が減ってしまい、それがどんどん上空に向かって広がっていく現象。

その生成メカニズムがある程度わかってきました。電離圏下部は夕方、軽い油の上に重い水が乗ったような不安定な構造になっており、これが、下層の大気中を伝わってきた大気重力波などによって揺すぶられ、一気に崩壊してできる、と考えられるのです。プラズマバブル現象は、後述するように人工衛星からの電波を遮ったり、いろいろな問題を起こします。



大気光を通して撮影されたプラズマバブル（鹿児島県佐多観測点）。

29. 電離圏にかたまりができる？（極冠域パッチ）



オーロラ帯よりも高緯度の極冠域（北極や南極の上空）では、日が当たらない極夜の期間に、電子密度の高いプラズマのかたまりが太陽方向から反太陽方向にいくつも流されてくることがあります。これが極冠域プラズマパッチ現象です。

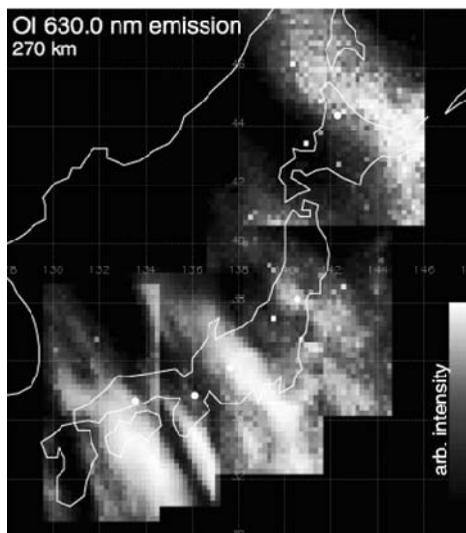
この現象は、日の当たっている昼間側の電離圏で生成したプラズマ密度の高い領域が、地球の磁気圏と太陽風のぶつかり合いによってはがされて、夜の方向に向かって極域を流されてくるために起こると考えられています。パッチのスケールは300 - 1000 kmと言われていますが、なぜこのようなスケールが多くなるのかは、まだよくわかっていません。

30. 電離圏がしましまになる？（中規模伝搬性電離圏擾乱）

日本などの中緯度の上空では、電離圏にしましまの波ができて、それが南西に向かって伝わっていく構造が、特に夏の夜間によく見られます。これを中規模伝搬性電離圏擾乱（Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance - MSTID）と呼びます。

夏の間ほぼ毎晩観測されること、伝搬方向がほとんど南西向きであることなどの特徴があり、電離圏のプラズマ不安定の一種と考えられていますが、原因はまだよくわかっていません。

名古屋大学太陽地球環境研究所の研究では、このしましま構造は、実は電離圏内の電場を伴っているものであることが、人工衛星データなどとの比較からわかっています。電場は磁力線を伝わって反対半球まで瞬時に伝わるので、日本とオーストラリアでは、地球の磁力線を介してきれいに対称になったしましま構造が観測されています。

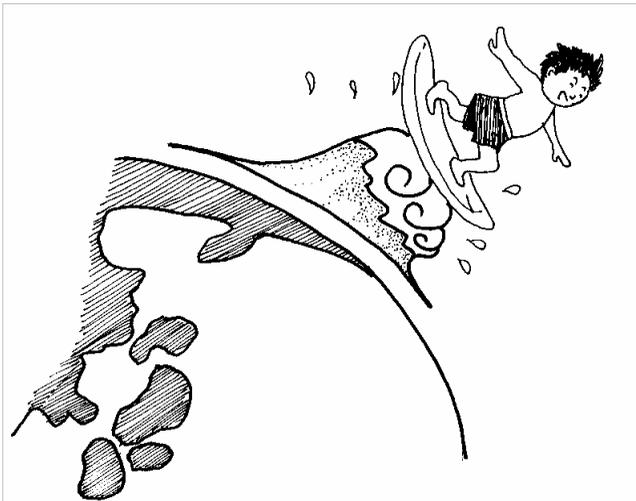


日本列島を南西に向けて横切る電離圏のしましま構造（地上5カ所で同時に撮影された大気光の合成画像）。

31. 電離圏を津波が伝わる？（大規模伝搬性電離圏擾乱）

磁気嵐などの大規模な電離圏擾乱^{じょうらん}がある時には、高緯度のオーロラ帯から中低緯度に向けて、巨大な津波のような波が電離圏の中を伝わっていくことがあります。これは大規模伝搬性電離圏擾乱^{じょうらん}（Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbance - LSTID）と呼ばれています。この波は、宇宙空間からオーロラ帯に高エネルギーのプラズマが降り込むことによって高緯度地方の熱圏が加熱され、暖められた大気から出てくるものです。熱圏の通常の風系を変えてしまうほどの大きな風と温度変化を伴います。

この風や温度の変化によって、大気光の輝度の変化や電離圏の密度・高さの変化など、中低緯度の熱圏・電離圏にさまざまな影響を及ぼします。宇宙空間からやってきたエネルギーが、大気で消費されていく過程の最後の舞台と言えるでしょう。

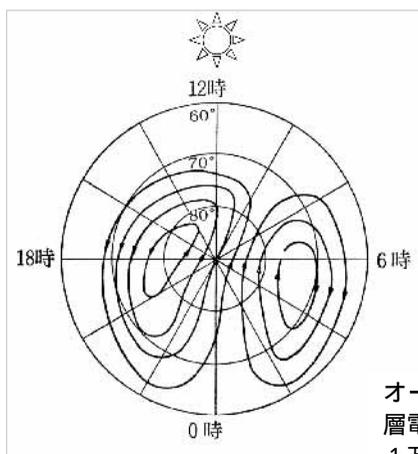


32. どうして電離圏には電流が流れているの？

電離圏が発見される前から、上空に電流が流れて磁場変化を起こしていることが予想されてきました。地磁気が1日の間に決まった変化をするからです。この電流は電離層電流と呼ばれていて、電離圏の中の電気を帯びた電子やイオンが動くことによって流れています。7や8で述べた熱圏における大気潮汐などの中性大気の変化が、プラズマを押し動かすことによって電流が流れるのです。

また、高緯度の電離圏では、宇宙空間からプラズマが降り注ぎ、オーロラを起こすと共に強い電離層電流(オーロラジェット電流)を流します。赤道域では電離圏の電子密度が増大しているため、大きい電離層電流が狭い範囲にわたって流れていることがわかっています。

特に極域のオーロラジェット電流は、磁気嵐の際には非常に強くなります。そして電流の変動にともなって、地上や送電線に誘導電流が流れ、発電所の機械が壊されたりすることもあります。しかし中低緯度の電離層電流は、極域の電流の100分の1程度であり、通常時はそういったことは起こりません。

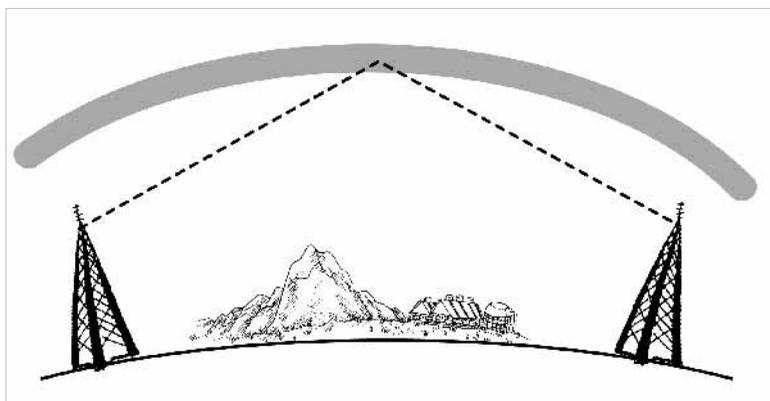


オーロラの活動が低い時の、極域の電離層電流パターンの例。隣り合う電流間に、1万アンペアの電流が流れています。

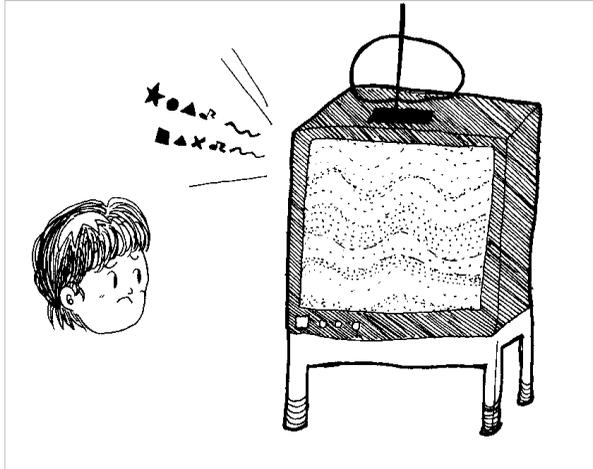
33. どうして電波は遠くまで伝わるの？

アマチュア無線では、電波を使ってアメリカやオーストラリアなど、遠くの国の人と話をすることができます。でも地球は丸いので、もし電波がまっすぐしか伝わらなければ、日本と遠くの国では電波をやりとりすることはできないはず。なぜ遠くの国のラジオが聞こえたり、アマチュア無線の電波が遠くの国まで届くのでしょうか？

電離圏は、電気を帯びたプラズマがあるので、ラジオなどの電波をはねかえす性質があります。とくに短波帯と呼ばれる周波数の高い電波に対しては、鏡のように反射を起こします。また、地面や海面も電波を少し反射することができます。地上の放送局から発射された電波は、上空 100 - 600 km にある電離圏と地上の間を何度も往復しながら、遠くの距離まで伝わることのできるのです。現在のようにインターネットで世界中がつながる時代でも、へき地や船・飛行機などで、こういった無線通信は大事な役割を果たしています。



34. スポラディックE層ってなに？



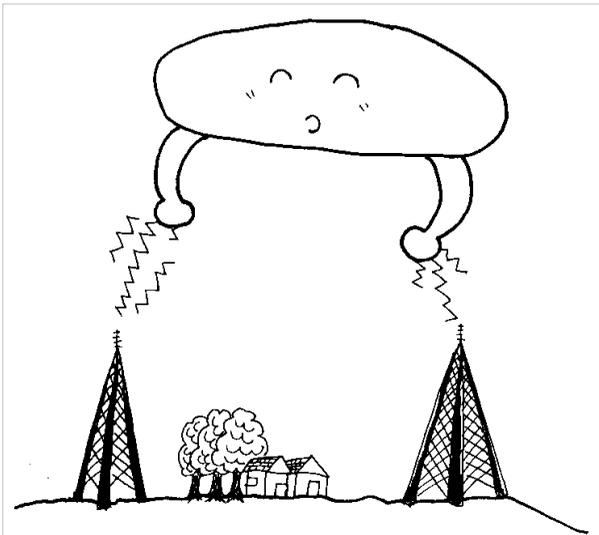
高さが 100 - 120 km の熱圏下部で、急に電子密度が高くなる層ができることがあり、スポラディック E 層と呼ばれています。スポラディックとは、突発的な、という意味。

日本では特に夏の夜間に頻繁に起きますが、赤道や極域にも起きることがあります。このスポラディック E 層が非常に発達した時は、通常は反射しない周波数帯の電波をはねかえすことができるので、短波通信の混信が起きることがあります。青森県のある街の防災無線放送が、関東地方で流れてしまったという話もあります。また、スポラディック E 層のなかで発生しているプラズマ不安定によって、人工衛星の電波がさえぎられてしまうこともあります。このスポラディック E 層は突然できるのですが、その発生原因にはなぞが多いのです。

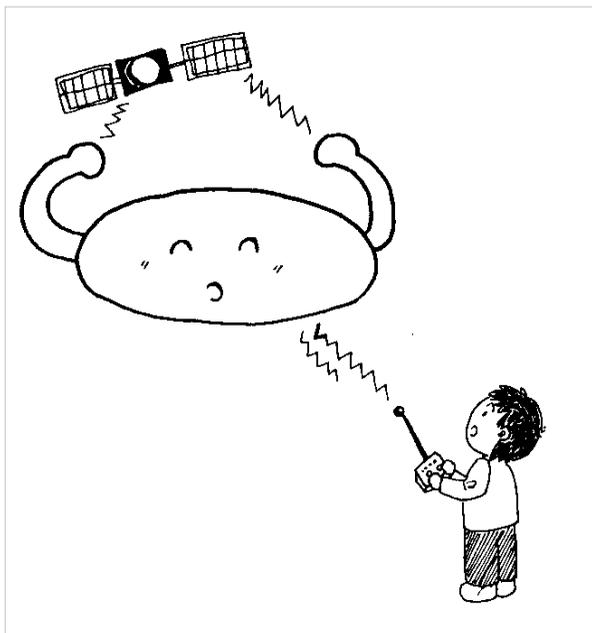
35. スポラディックE層のなぜって？

スポラディック E 層がなぜできるのかは、まだよくわかっていません。高さ 100 - 120 km で、東西方向に吹いている風の速度が高さによって大きく変わっている時に、その風速の違いによって、電気を帯びたイオンがある特定の高さに集められてできていると考えられています。

しかし、なぜ日本付近や他のいくつかの場所で特に頻繁に発生するのか、なぜ夏の夜間に多いのかなど、わからないことも多いのです。最近のレーダーによる詳細な観測から、スポラディック E 層は、数十 km から数百 km の大きさの斑点のような形で上空に現れていることが明らかにされました。ですが、このような斑点構造がどのようにしてできるのかもわかっていません。10 で述べた大気重力波がその変動に関わっている、という説もあります。



36. シンチレーションってなに？



プラズマバブルやオーロラ、強いスポラディック E 層が上空の電離圏に存在する時は、人工衛星など宇宙からやってくる電波が電離圏の中で乱されて、地上に届きにくくなることがあります。これは、シンチレーションと呼ばれる現象です。

シンチレーションは、電離圏の中のプラズマが空間的に非常に乱れている時に、そのプラズマが電波とエネルギーをやりとりすることによって、電波を乱してしまいます。人工衛星との通信を考える上で、このシンチレーションは深刻な問題なのです。

37. 電離圏にも嵐があるの？

太陽にフレアなどの大きな爆発が起こり、そこから発生した強い太陽風と磁場が地球に到達すると、磁気嵐と呼ばれる地球規模の擾乱現象じょうらんが地球のまわりの宇宙空間で発生し、オーロラが明るく輝いたり、地磁気が大きく乱れたりします。この時、電離圏でも嵐が発生します。

宇宙空間から極域に注入されたオーロラなどのエネルギーによって、熱圏大気じつけんたいきの風や温度、さらに大気たいきの成分までが変化してしまいます。これに伴って、電離圏のプラズマも大きく変動することがわかってきました。電離圏嵐と呼んでいます。

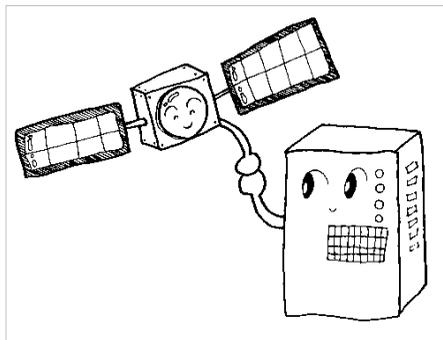
電離圏の嵐では、電離圏の電子密度が大きく減少する時（負の電離圏嵐）と増大する時（正の電離圏嵐）があります。31 で説明した電離圏を伝わる津波も、電離圏嵐の一つの姿なのです。



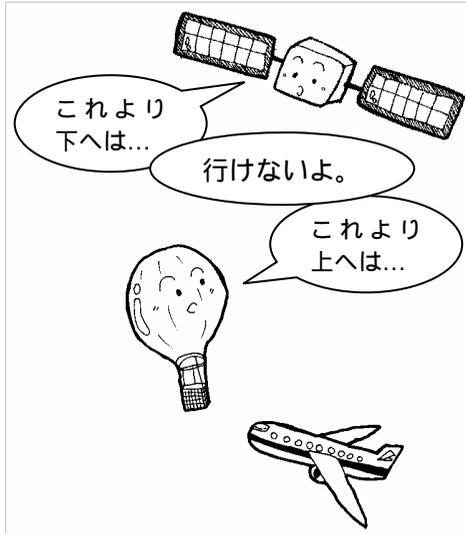
38. 大気のとっぺんはどうやって調べる？

大気のとっぺんである中間圏や熱圏を調べるためには、さまざまな観測手法があります。そのほとんどが、光や電波を使っています。それらの手法は、自然界に存在する光や電波を使うものと、観測者が自分から光や電波を出して、それが大気のとっぺん付近からはね返ってきた強さを測定するという2種類に分けることができます。どちらの場合も、非常に弱い光や電波を受信しなければなりません。そのため、大きな面積の受信部や高感度の光学機器など、特殊な機械を使って測定することになります。

これらの観測には、地上から行うものと人工衛星から行うものがあります。人工衛星は数時間で地球を一周するので、広い範囲の情報を得ることができます。しかし同じ場所にとどまっていることができないので、ある場所の時間変化を調べることができません。一方、地上観測は、ある場所での時間変化をずっと追うことができ、さらに人工衛星より詳細な観測が可能です。一カ所だけの観測から空間的な広がりを調べることはできません。地上観測と人工衛星観測は、お互いの弱点を補い合いながら、実施されているのです。



39. 大気のとっぺんまで行くことはできるの？



大気のとっぺんを調べるには、そこに行って直接その場所を測定すれば良いように思えますね。しかし、高さが 50 km から上の中間圏、熱圏、電離圏は、実はとても行きにくいところ。飛行機はせいぜい 20 km くらいまでしか上がれませんが、最も高く上がる無人気球でも、50 km くらいが最高です。一方、人工衛星は高度が低くなると大気の摩擦ですぐ落ちてしまうので、長い時間飛翔できる高さは 300 km よりも上です。従って、大気の気温が急激に変わる中間圏の上部 (80 - 100 km) や、電離圏の E 領域 (90 - 130 km) あたりは、直接測定することが最も難しい高さなのです。

唯一の可能な方法は、観測ロケットを打ち上げること。ですが、何回も上げることは難しいので、本当に限られたデータしか得ることができません。大気のとっぺんの観測は、地上からのリモートセンシング (遠隔走査) 観測や人工衛星観測によるものがほとんどです。

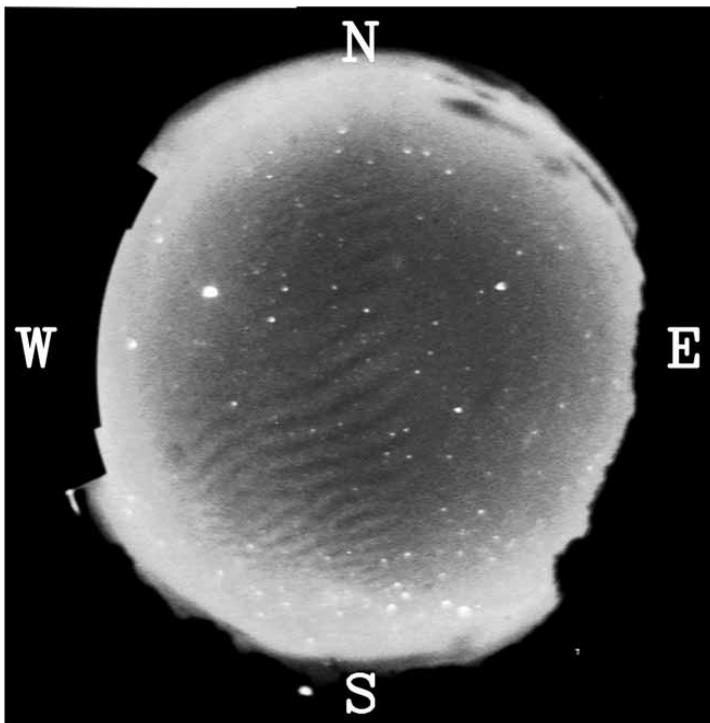
40. 光を使って大気のとっぺんを調べる？

17 - 22 で述べたように、大気のとっぺんは大気光と呼ばれる目に見えないくらい弱い光を出しています。この光を高感度の機器で測ることにより、中間圏や熱圏、電離圏を調べることができます。1990 年代に開発された冷却 CCD* 素子は非常に感度が高く、これまで目に見えなかった大気光のイメージ画像を取得することが可能になりました。この冷却 CCD カメラを使い、大気のとっぺんで起きている大気重力波やプラズマバブルなどの乱れが目に見えるようになってきて、この分野の科学は革新的に進んでいます。

さらに大気光は、決まった波長で光っています。大気のとっぺんで風が吹いていると、ドップラー効果と呼ばれる効果でこの波長が少しずつずれてきます。この波長のずれを地上から精密に測定することにより、大気光が光っている高さでの風速や温度も測定することができます。こういった光を使って大気のとっぺんを調べる方法は、他の手法と比べて安価で簡単に行うことができるので、利用価値が高いのです。

* CCD とは、Charge Coupled Device の略で、人間の目で言えば網膜にあたる部分です。レンズを通して入ってきた光を電気信号に変換することができます。現在では、デジタルカメラやビデオなどに広く使われています。冷却 CCD 素子は、この CCD をマイナス 50 度以下に冷やすことによって、装置のノイズを非常に低くして、暗い光もキャッチできるようにしています。





大気光を通して観測した中間圏の大気重力波の画像。特に左下の部分に南西から北東方向に波面を持つ大気重力波が見える。白い点は星。

41. レーザー光線を使って大気のおつぺんを調べる？

レーザー光線は、まっすぐな強い光を出すことができます。地上からレーザー光線を大気に向けて打つと、そのごく一部が大気中で散乱されてまた地上まで返ってきます。この返ってきたレーザー光線には、散乱した大気分子・原子の情報が含まれているので、そこから大気密度や温度、風速を調べることができます。レーザー光線を短い時間間隔でついたり消したりしながら上空に向かって打つと、打ってから返ってくるまでの時間差から、はね返ってきた高さもわかるのです。このような方法をレーザーライダー、または簡単にライダーと呼んでいます。

ライダーによる地上からのリモートセンシングは、地上付近から高さ 100 km くらいまでの大気の高さ分布を調べるのにとっても有効な方法。ライダー観測の時、夜中に観測所の建物の屋根から、緑色のレーザービームがまっすぐに空に向かって打ち上げられているのを見ると、まるでスターウォーズの光景のように見えます。



42. レーダーで電離圏を調べることができるの？

飛行場で飛行機の位置を知らせたり、天気予報で雨雲の位置を知らせたりすることができるレーダーは、アンテナから電波を出して、はねかえってきた電波を調べる機械。4章で述べたように、電離圏は短波帯の周波数をもつ電波をはねかえす性質があるので、レーダーは電離圏を調べるためにとても有効な方法なのです。

アンテナから発射する電波の周波数を変えて電離圏の高さ構造を調べたり、電子密度を調べることができます。さらに、電離圏だけでなく、大気分子・原子によるごく弱い電波の散乱を大型のレーダーでとらえることにより、地表付近から高さ 1000 km にわたる広い領域の大気や電離圏のようすを調べることができるのです。



電離圏を測るための巨大レーダー（ノルウェー・スヴァールバル島）

43. 流れ星を使って大気のとっぺんを調べるができるのはなぜ？

前述したレーダーの中には、流星レーダーと呼ばれる種類があります。高さ 70 - 100 km の風速や温度分布を測ることができるのです。では、なぜ流星を使って、大気の風や温度を測ることができるのでしょうか？

24 で述べたように、流れ星はそのほとんどが、高さ 70 - 100 km 付近の中間圏上部で、大気との摩擦によって消滅します。この時に生じるプラズマ（つまり、流星の飛跡）は、レーダーの電波をよく反射します。流星の飛跡から返ってくるこの電波を受信することによって、その高さの大気の風や温度を測ることができるというわけ。目で見える流星は少ないですが、レーダーを使えば、目では見えないようなごく小さな流星までとらえることができるので、その数は 1 分間に数十個に達します。



44. 宇宙からの電波を使って オーロラの電離圏を調べることができるの？

私たちの銀河やそれよりも遠くの星のなかには、電波を出しているものがたくさんあり、その電波は地球に向かって降り注いでいます。こうした宇宙からの電波を使って、電離圏を調べることができるんですよ。特にオーロラが光っている時の電離圏は、電子密度が非常に高くなっていて、宇宙からの電波の一部を吸収することができます。そこで、電波の来る方向が区別できるようなアンテナをつくって宇宙からの電波をいつも測っていれば、昼間や曇っている時のようにオーロラが目で見えない時にも、どちらの方向にオーロラが出ているかがわかるのです。

このようなアンテナを、リオメータと呼びます。光で観測する時に比べ、細かい空間構造はわからないのですが、リオメータは光での観測を補う重要な機械です。



リオメータ（ノルウェー・スヴァールバル島）

45. カーナビで電離圏を調べることができるの？

カーナビでは、GPS という高度 20200 km にある複数の人工衛星からの電波を受信して、その電波の到達時刻の違いから、現在の位置を計算しています。この電波が電離圏を通過してくる時に、その電子密度によって到達時刻が若干遅れます。この遅れの時間を正確に測ることによって、電離圏の電子密度がわかるというわけ。

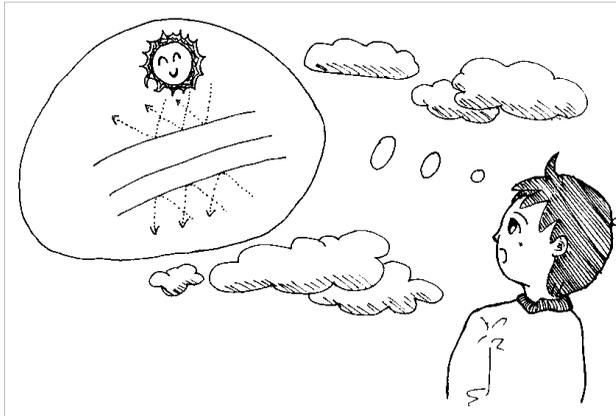
カーナビをもう少し工夫して、この遅れの時間を計ることができるようにした GPS 受信器があります。これは主に地震に関連した地殻変動をとらえることを目的として、国土地理院によって日本全国に 1000 点以上設置されています。このデータを使えば、日本の広い範囲にわたる電離圏の電子密度を知ることができます。



6章： 人との関わり



46. なぜ大気のでっぺんを研究するの？



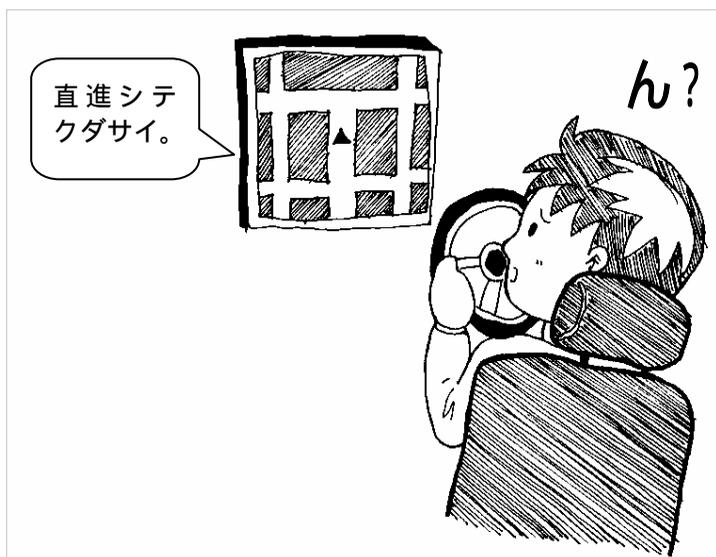
なぜ大気のでっぺんの研究が、いま盛んに行われているのでしょうか？ 科学的に、わからない現象がたくさん残されているし、新しい発見もまだまだ行われているから。それももちろんですが、大きな理由の一つとして、大気のでっぺんが人間活動と深い関わりを持っているため、ということがあります。

高さ 50 km - 1000 km の中間圏、熱圏、電離圏は、もちろん普通では行くことができないわけですが、太陽の紫外線をさえぎったり、電波を反射・吸収したり、地上にもさまざまな影響を及ぼします。この章では、大気のでっぺんと人間活動の関わりを解説することにしましょう。

47. 電離圏でカーナビが狂う？

45 に書いたように、カーナビに使われる GPS 衛星の電波は、電離圏を伝わる時に、その中のプラズマによって少しの遅れが生じます。この遅れによって、時間差を使って位置を決めているカーナビの位置精度も少し狂ってきます。通常、このずれは数 m なのですが、磁気嵐やそれに伴う電離圏嵐で電子密度が変動すると、日本のような中緯度でも時には数十 m から 100 m に達することがあるほど。

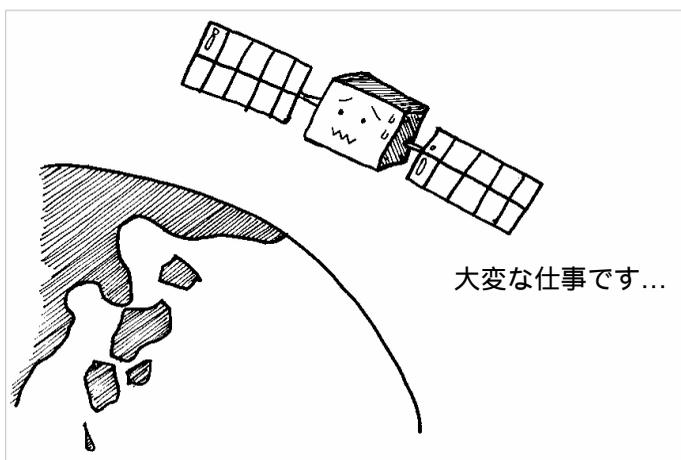
また、28 で書いたように赤道域によく現れるプラズマバブルの中では、GPS 衛星の電波が完全にさえぎられてしまうことが多いので、プラズマバブルが上空にある時は、カーナビが使えないこととなります。このように、GPS による位置の決定に対して、電離圏の影響は無視できないことが多いのです。



48. なぜ大気のでっぺんの高さが変わると 人工衛星が壊れるの？

中間圏や熱圏の大気の密度は、太陽の紫外線や地磁気の変化によって大きく変わっています。地球を観測していた「ランドサット」や「みどり」などの科学衛星は、宇宙空間を飛翔しているといっても、実際には熱圏の中を通過しています。つまり、熱圏大気が衛星にぶつかる抵抗を、ごくわずかなブレーキとして常に感じているのです。

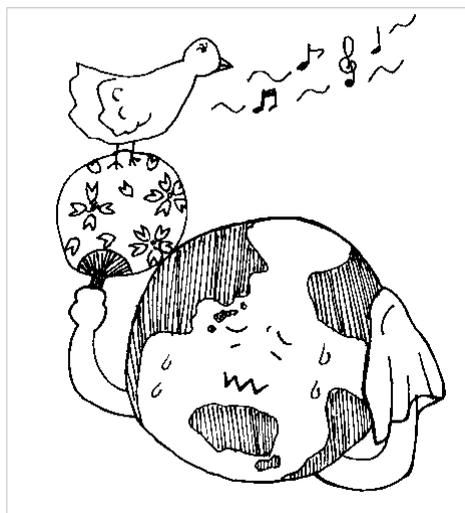
熱圏の中を何年も人工衛星が飛んでいると、このブレーキの力によって衛星の高度は少しずつ下がっていきます。人工衛星の寿命を決める要素はいろいろありますが、大気抵抗の力による衛星高度の減少も、その要素の一つ。熱圏の大気は非常に薄いのですが、太陽でのフレア爆発や磁気嵐などで大気が加熱されて膨張すると、人工衛星の高さでの大気の密度が急激に上昇し、大気抵抗の力が人工衛星の姿勢を大きく変えてしまったり、衛星の寿命を縮めてしまうこともあるのです。



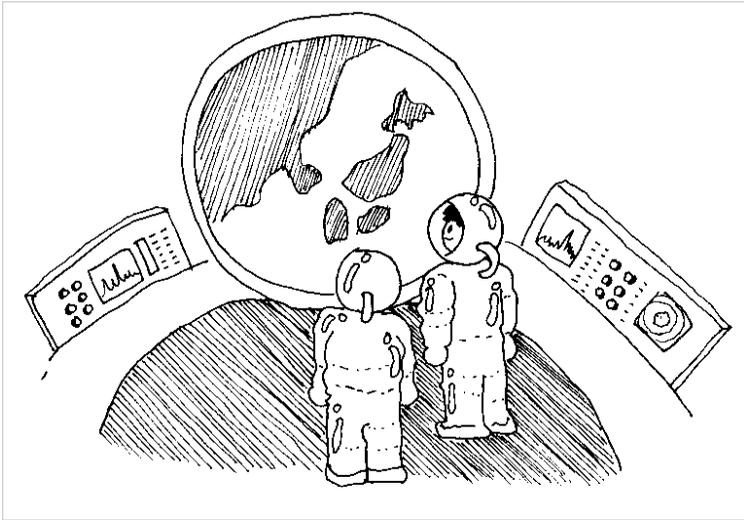
49. 大気のとっぺんは鉱夫のカナリア？

昔、炭坑に入る鉱夫はカナリアをかごに入れて持っていきました。というのも、匂いや色が無い有毒ガスが炭坑から吹き出した場合、それまで鳴いていたカナリアが最初に死んでしまうことで、有毒ガスの発生がわかるから。これと同じことが、大気のとっぺんと地球温暖化の間にも言えるでしょう。

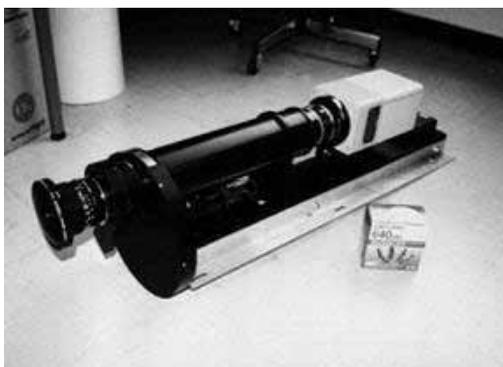
16 で述べたように、地球表面の温暖化が進むと、逆に中間圏や熱圏の温度は下がります。実際、1989年には、米国立大気科学研究所の研究グループが、「温室効果ガスが現在の量の2倍になると、中間圏では10度、熱圏では50度も温度が低くなる」と予想したモデル計算の結果を発表しました。この値は、地上の温暖化による温度上昇よりもはるかに大きいのです。そのため、成層圏や中間圏の温度を長い時間継続して測ることにより、地球の温暖化の状況をより早く知ることができるかもしれません。



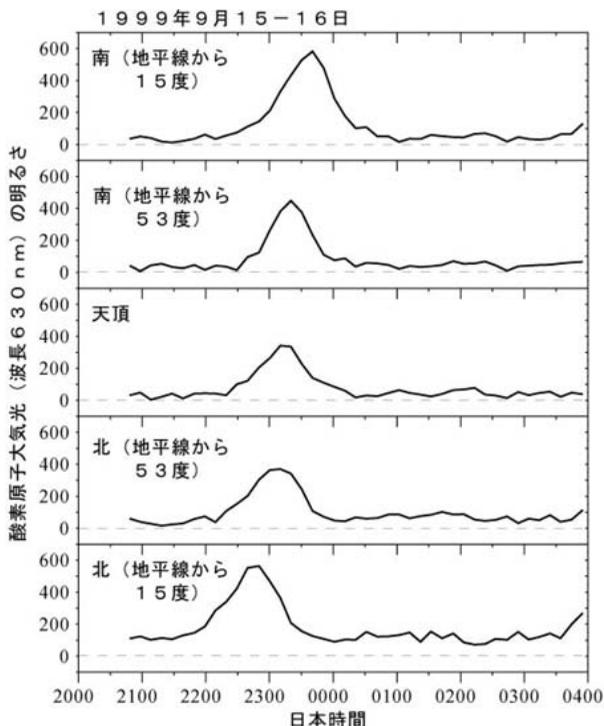
50. 大気のとっぺんには人が住んでいる？



熱圏の高さを飛んでいるのは、人工衛星だけではありません。人間が搭乗しているスペースシャトルや国際宇宙ステーションも同じです。これまで述べてきたような通信障害や衛星寿命の問題は、こういった有人飛行においても重要だとすぐに想像がつかますね。将来、スペースコロニー（宇宙植民地）などで人類が宇宙に踏み出す時、最初はこの熱圏の高さで地球を周回する巨大な衛星に住むと考えられます。そのような時代には、ある時は衛星の窓の外を巨大なプラズマバブルが横切ったり、眼下にオーロラが過ぎていくのを眺めたり…。中間圏・熱圏や電離圏の科学は、今よりももっともっと身近な科学になっていることでしょう。



インドネシアでの大気光観測カメラの設置風景(名古屋大学太陽地球環境研究所)。

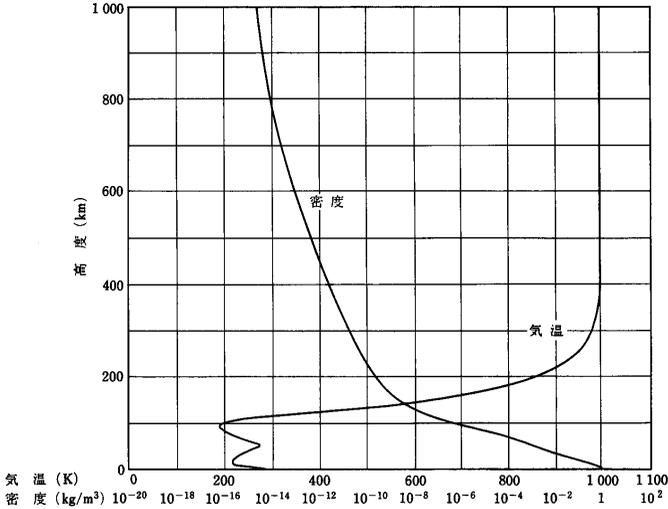


北海道陸別観測所で、磁気嵐中にとらえられた大気のとっぺんの津波 (大規模伝搬性電離圏擾乱)。大気光の明るい部分が北から南に伝わっていくのがわかる (名古屋大学太陽地球環境研究所)。

資料 / イラストの提供・出典一覧

-
- 30 : 第1回 FRONT キャンペーン観測の結果。観測協力：名古屋大学太陽地球環境研究所、東北大学大学院理学研究科、通信総合研究所 (現 NICT)、新潟大学理学部、京都大学大学院理学研究科、京都大学宇宙電波科学研究センター (現生存圏研究所)
- 32 : Nagata T., and S. Kokubun, Rep. Ionos. Space Res., Japan, vol.16, 256-274, 1962.
永田武・等松隆夫「超高層大気のパワロジー」(裳華房)
- 3, 15, 18, 20, 28, 40, 42, 44 : 名古屋大学太陽地球環境研究所
-

気温、密度の高度分布



<国立天文台編「理科年表(第77冊)」(丸善株式会社)より>

大気のつぺん 50のなせ

発行日 2005年6月1日

企画・制作 名古屋大学太陽地球環境研究所
りくべつ宇宙地球科学館
豊川市ジオスペース館

文 塩川 和夫
絵 大村 純子
編集 野田ゆかり

発行 名古屋大学 太陽地球環境研究所
(〒442-8507 豊川市穂ノ原 3-13)
<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/>

印刷/製本 大陽出版株式会社
(〒441-8077 豊橋市神野新田町口ノ割 200)

本冊子は、平成17年度名古屋大学地域貢献特別支援事業の一環として制作されました。

All rights reserved.

大気をつっぺん 50のなぜ

