

# 宇宙の天気とはなにか

上出洋介

太陽-地球間で発生するオーロラ・磁気嵐などの電磁気プロセスを総合的に解釈し、将来の予報につなげようとする“宇宙天気プロジェクト”が国際共同研究として動き出している。オーロラ鑑賞のための出現予報はもとより、高エネルギー粒子の人工衛星直撃や、オーロラ電流の地上送電線への誘導、宇宙通信の被害などを最小にするという緊急性もある。宇宙天気の定量的予報のためには、太陽-地球間の宇宙空間を不安定な電磁場として捉え、その中で発生するプラズマ素過程現象を理解するという基礎的な難題も多い。〈カラーページ参照〉

“宇宙の天気”といっても、宇宙で雨が降ったり、雪が降ったりするわけではない。しかし、太陽からプラズマの強い風が吹いて地球磁場を小さな領域に閉じ込めてしまったり、ときどき津波のような衝撃波が地球付近まで押し寄せたり、電離層付近の温度を急上昇させたりと、地球上の天気と共通する言葉で表現される点も多い。本稿では、最近世界の学界で集中的に始められた“宇宙天気解明の共同プロジェクト”の目的、その方法について解説する。

## 宇宙天気現象

人類の歴史で、オーロラはユニークな位置を占めてきた。北の空に妖しく舞うこの光を前に、人びとは畏敬の念で立ちつくすだけであった。ふだんオーロラは、北の地平線で光っていたが、ときには中低緯度の文明圏まで迫ってきた。当時、北の地平線はこの世の果てで、神の棲む世界であったから、赤いオーロラが北の空からやってくると、それは神の怒りの標として怖れられたのも無理がないことである。20世紀に入り、科学者はオーロラとともに生きる世界中の地球磁場の乱れ(つまり磁気嵐)は、太陽のどこかよくわからないM

(ミステリアスの略)領域に原因があり、その領域が地球の方を向いたときに磁気嵐が発生すると考えた。磁気嵐は太陽の自転周期27日ごとに発生し、ある程度予報ができるわけである。また、第二次世界大戦のとき、イギリスで無線通信が途絶えたとき、通信が敵にじゃまされたと思い、それがオーロラによるいたずらであるとは誰も思わなかった。これらは、今でいう宇宙天気現象の例である。

宇宙の天気とは、人工衛星や地上の技術システムに損害を与え、人間の健康や社会機能に影響を及ぼす可能性があるような、太陽、太陽風(惑星間空間)、磁気圏、電離圏、熱圏の状態のことを指す。宇宙環境でのこうした過酷な状態(人間にとって過酷なだけで、自然にとってはごく当たり前の状態)は、人工衛星のオペレーション、通信、飛行機や船舶の航行、電力供給に障害を与え、多種多様な社会・経済混乱を招きかねない。

現代社会の宇宙・通信技術への依存度は加速度的に増加しているため、宇宙天気の変化によって直接の影響を受けることは必至のことである。工学技術の発展によって私たちの日常生活は便利になり、台風の進路を予測したり、地震情報がただちに送られてきたり、科学・技術は自然災害からの損害を減らすことにも貢献してきた。しかし、

このことは逆にいえば、文明社会、とくに最近のコンピュータ、宇宙通信技術の発展は、宇宙天気による損害を増すように発達してきたということでもある。宇宙の“わるい”天気によって人間の文明生活が少し不便になるだけではなく、こうした影響は世界の経済界に打撃を与え、また人間の生命を奪うことにもなりかねない。これらの実害は、宇宙天気の正確な予報をすることで少なくすることができるはずである。

いま私たちがもっている宇宙空間への知識、技術を使って、宇宙天気の現状を知ること、さらに今後の予報を出すことは可能なのか、あるいは、より正確な宇宙天気予報ができるようになるには、どの部分の研究を集中的に行なえばいいのだろうか。

### 宇宙と地球の境界はどこ？

私たちが太陽の光/熱と地球大気のお世話になっていることは、誰でも知っている。ところが、地球の磁場が、いかに地上の生命や私たちの日常生活に役に立っているかを、実感として知っている人は意外と少ない。もし地球が磁場をもっていなければ、私たちの生命はありえないのである。宇宙を飛び交っている高エネルギーの宇宙線がおかまもなく地上にやってきて、脳がダメージを受け、遺伝子が殺られる。だいいち地球が磁場をもっていなければ、太陽からのプラズマがもろに吹き付け、この大気を吹き飛ばしてしまっているはずである。実は、“宇宙の天気”は、惑星地球号が自前の磁場をもっていることに大きくかかわっている。

では、いったいどこまでが私たちの地球の勢力範囲で、どこからが宇宙空間なのか。たとえば、地球上では……固体/液体/気体が物質の三つの状態である。温度の高いところは暑い、低いところは寒い。

宇宙では……99%以上が電気(プラズマ)の世界。温度が太陽活動により刻々と変わると分けることができる。では、それらの境界はどこにあるのか。“スペースシャトルで宇宙遊泳”

というニュースを聞くが、あのあたり(わずか地上から300 km)は宇宙なのか。

地球上の生命は、実は二つのバリアー(barrier)によってしっかりと守られている。第1のバリアーは当然大気層である。宇宙からはほとんどとるに足らない薄いベールのようにみえる(カラーページ①)。この大気層こそ、私たちの命をつなぐ遺伝子に有害な太陽紫外線を吸収してくれている。さらに、地上からの放射エネルギーが宇宙空間へ逃げていくのを適度に防ぎ、地球の温度を一定に保つ働きもしている。長い地球進化過程の中で、生命が海中だけではなく、陸上にも生存していけるようになったのは、大気と海との絶妙なドラマが繰り返されたからである。

地上100~数百 kmで、この大気がしだいに終わり、そこから果てしない宇宙空間が始まる。この棲みやすい環境の厚さはわずか100 kmで、つまりそこから先が宇宙である。宇宙空間は決して無の世界ではなく、高エネルギーの粒子、電場/磁場、超高温の気体(つまりプラズマ)で満たされている。プラズマは電流を伝え、電場/磁場と作用する。そして、生命を守る第2のバリアーは、地球の磁場である。逆にいえば、地球が磁力をもっているために、宇宙空間でおきている過酷な現象に私たちはふだん気がついていないことになる。

宇宙と地球がちょうど接するところで光っているのが、オーロラである。地球の大気(つまり、電氣的に中性の世界)と宇宙プラズマ(つまり、電気の世界)の接点で光るオーロラは、地球外の電気の世界でおきている事件を映しているカラーテレビのようなものである。そのため、オーロラの色、形、動きのひとつひとつには宇宙のメッセージが秘められているといえる。オーロラを観測することによって、太陽-地球間でのエネルギーの流れ、その変換過程の秘密を解き明かそうとしていることになる。

以上のことを別の言葉でいえば、私たちの地球は実は太陽の大気の中にあるのであるが、地球が大気と磁場をもっているため、太陽圏の中にこんな平和で棲みやすい空洞環境をつくっているということになる。

表1 宇宙天気予報の研究はなぜ必要か。

人工衛星	太陽からの高エネルギーの粒子は、人工衛星内の電子部品に損害を与え、誤信号を送ったり、間違っているデータを地上に送り込む。また、衛星表面に過剰電荷を与え誤操作を引きおこしたり、衛星自体の寿命を短くしたりする。このような被害は、高エネルギー粒子侵入が前もって予測できれば、かなりの割合で防ぐことができる。 オーロラから発生する熱( $10^{13}$ Wにも達する)は、大気の膨張をおこし、人工衛星の軌道を狂わせる。1979年のスカイラブ事件のように、衛星の落下を招くこともある。スペースシャトルの大気圏突入に際して、この効果を入れた正確な計算を行わなければ、乗組員の生命がなくなる。
電力系	送電線の配置は、広範囲に及び複雑化している。磁気嵐のときのオーロラ電流によって、これらの送電線に誘導電流が流れ、ときには何億円もする装置に被害を受ける。
航行	LORAN や OMEGA など、VLF 帯を使っている船舶の航行システムは、電離層の高度の正確な把握がカギである。磁気嵐のときの電離層高度の変化は、現在地の計算に何 km ものエラーを生じる。 GPS は、クルマの現在地の確認のためなど現代社会/日常生活で欠かせない要素になっている。現在日本では 40 万台以上のクルマに、GPS システムがとりつけられている。また、将来航空機の離発着に GPS が用いられることが計画されているが、これらの計算にも誤差を生じる。
通信	あらゆる通信は、多かれ少なかれ宇宙の天気の影響を受ける。とくに、オーロラ出現時に HF 無線信号は、電離層に吸収されてしまい、地上に戻ってこない。地上局と人工衛星を結ぶ通信も現代では生活に浸透していて、磁気嵐はテレビ/雑誌/新聞ニュースの配信網を乱してしまう。
宇宙空間での人間活動	人工衛星計器への損害だけではなく、宇宙空間を飛来する高エネルギー粒子は、スペースシャトル船外での人間の活動にも影響を及ぼす。地上では、ふだん地球の大気と磁場というバリアーにより、私たちの生命がこのような粒子衝突から守られている。
極まわりの航空機	飛行機に乗っていても、高エネルギーの宇宙線を浴びる。こうした路線に何度も乗ると、原子力発電所で働く人の年間被曝線量平均 1 ミリシーベルトを超える可能性もある。
動物・人間の磁場感知能力	伝書バトやイルカが地球の磁場をたよりに行動していることは、よく知られている。国際伝書バトレースは、宇宙天気の長期予報によって開催を決めている。人間への磁場の影響の研究も始まっている。
オーロラ長期予報	ガウスが 18 世紀初め、初めて地球の全磁力を測定して以来、地球の磁力は着実に減っている。このままの率で減少を続ければ、あと 1200 年で磁力はゼロになるという計算になる。あと 700 年もすれば、日本からも毎晩みごとなオーロラがみえる計算になるが、その分危険な高エネルギー粒子が直接地上にやってくることになる。

惑星にオーロラが出現するには、大気と磁場というまさにこの二つの条件が必要である。上に述べたように、この二つは生命存続にも必要な要素なのだから、地球にオーロラがあるということは、私たちがこの惑星地球号に生きていける証でもある。

人工衛星が計測器を運び、精密な直接データが得られるようになった。地上からだけではなく、オーロラのカーテンの上側に回って、人工衛星から写真撮影できるようにもなったし、オーロラを発生させている太陽からのプラズマ粒子を直接測ることも可能になった。オーロラにレーダー電波をあてて、オーロラの正体をみることもできるようになった。さらに、オーロラだけではなく、太陽-地球間空間でおきているいろいろな電磁現象が微妙に絡み合っていることがわかってくると同時に、今まで考えもつかなかった新しい疑問もどんどん出てきた。

この太陽-地球間の宇宙空間は、理論と観測が

調和した、ユニークな実験室にもなっている。すなわち、物理学の基本法則の上に組み立てたモデル計算を、コンピュータを使って次々と走らせ、地上や人工衛星からの観測データとの比較テストをリアルタイムで行なうことができるようになりつつある。

### 急速に進む宇宙天気プロジェクト

表1は、太陽によって地球周辺の宇宙空間の状態が、社会・経済にいかにも多種多様の障害や混乱をおこしかねないかを示している。オーロラ出現の予報をすることも宇宙天気予報の一つであるが、磁気圏や上層大気の過酷な状態を的確に知ることは現代社会では必須のことになりつつある。図1は、宇宙の天気が、人工衛星/地球上のシステムの性能に影響を与え、生命にも危険をもたらす可能性があることを表わしている。

宇宙天気の重要さを認識し、アメリカ合衆国で



X線、いろいろな波長の電波で太陽の実像を視ることができ、これらで撮った太陽は、いつも烈しく活動している。太陽は、太陽風とよばれる高温プラズマを一瞬も休まず放出し、惑星間空間を満たしている。太陽風は、ふだん毎秒500 kmの高速で吹いており(それでも太陽から地球まで3日もかかる)、太陽の磁場も剥ぎ取ってくる。

太陽の磁場を運んでいる太陽風プラズマは、地球の磁場と作用し、そこに自然の大発電所をつくっている。発電量は何兆ワットにも達する。一言でいえば、オーロラは、この発電所からの放電現象なのである。地球の磁力線に沿った電場で加速された電子が、地上100~500 kmの超高層大気と衝突し、オーロラとして発光する。太陽でフレアやコロナホール(穴)が活発になり、地球の磁場が大幅に乱され磁気嵐になると、オーロラは何日間も休みなしに現われ、オーロラ帯も拡大する<sup>(3)</sup>。しかし、“この発電所の発電効率是谁が決めるのか”、“オーロラの源は太陽なのに、なぜオーロラは夜の方で強く光るのか”、“太陽風はいつでも吹いているのに、なぜオーロラは突然光り出すのか”、“太陽面爆発現象フレアや黒点、コロナホールは、オーロラ出現とどのように関係しているのか”、“オーロラのカーテンはどのようにしてあのように烈しく動くのだろうか”、“オーロラから出る膨大な量の熱はどこへいくのか”など、わからないことがまだまだたくさんある。

オーロラを宇宙からみると、地球がまるで光の冠をかぶっているかのように見える。この光のリングは、いつも大きくなったり小さくなったり活動をしており、太陽活動がさかんになると、日本の方にも迫ってくる。また、この大きなリングの真夜中付近で、数時間に一度、突然一部分が明るくなり光の束が走り回る、“オーロラ嵐”とよばれる現象が発生する。

オーロラの中には大電流が流れている。オーロラ嵐が最高潮のときには、全電流は1000万Aにも達する。かかっている電圧は数百kV、電力にして100億kW。オーロラ電流からはジュール熱が出て、まわりの大気に放出される。

オーロラ電流は、まわりの空間に磁場をつくる。

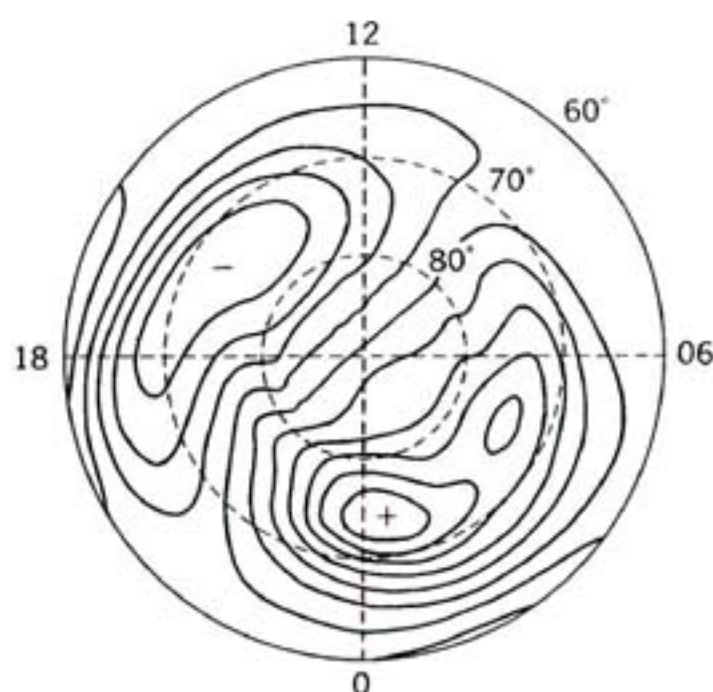


図2 オーロラに伴う、電離層にかかっている電圧の分布図(5 kV 間隔)。上方が太陽の方向、緯度は地磁気緯度である。

オーロラ電流による磁場の効果は、はるか赤道地域にまで及ぶ。したがって、その磁場変動を世界中で観測していれば、オーロラ電流の分布を計算できるはずである。カラーページ<sup>(2)</sup>は、オーロラ嵐が最高潮に達したときの例をたくさん集めて、地上の磁場変動とレーダーのデータを駆使して、オーロラの中を流れる電流の世界分布を計算したものである。オーロラが活発な真夜中を中心として、大規模な西向き電流が流れているのがわかる。さらに詳しい計算をすれば、この電流を供給している宇宙空間から流れ込む量も求めることができる。

これほど大規模な電流を抱えているため、オーロラはときどきいたずらをする。しかもスケールが大きい。オーロラ電流が地上の送電線に異常な誘導電流を発生させ、変圧器の機能を麻痺させたり、電圧を低下させたりする。ニューヨークやトロントなどの大都市で停電がおり、社会問題になった事件もある。石油やガスのパイプラインに電流が誘導されると、パイプの腐食の原因にもなるし、パイプの温度が上がって周囲の動植物の生態系が乱れる。世界中の伝書バトや渡り鳥も狂ってしまう。

たとえば、図2に示したオーロラ電流に伴う電離層の電圧分布は、私たちが毎日の新聞やテレビの天気予報でみる気圧配置図に非常に似ている。実際、それらに使われる微分方程式にも共通して

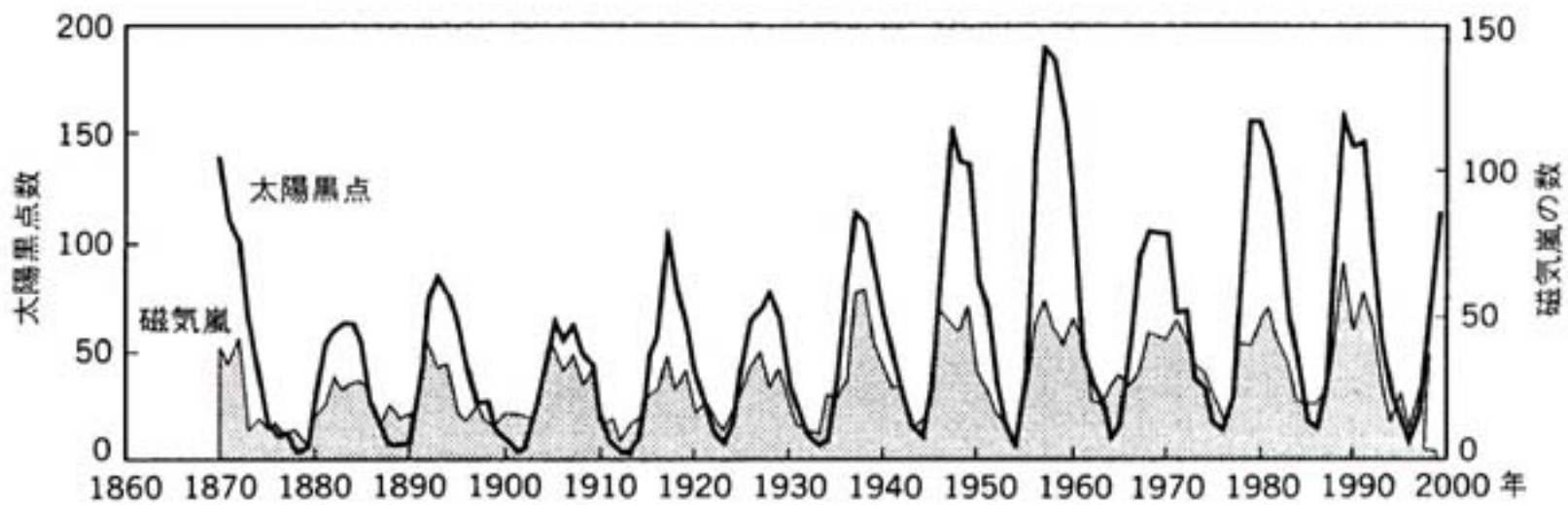


図3 太陽黒点数と磁気嵐(ただし、太陽風ショックによって始まった嵐だけ)の発生数(Solar-Geophysical Data, NOAA(H. E. COFFEY)による)。西暦2000年中に、現在の太陽活動がピークに達するはずである。

いる要素が多い。

いま私たちの研究室では、世界中の拠点をコンピュータネットワークで結び、カラーページ②のような電流分布や図2のような電圧分布を刻々と計算する計画を進めている。これが実現すれば、激しいオーロラがいつどこに現われるかはもとより、太陽-地球間の天気についても的確な予報を出すことができるはずである。

太陽-地球環境データ解析システム(Geospace Environment Data Analysis System)とよばれるこの新しい解析システムは、たとえばインプットとして、太陽風プラズマ、世界100カ所からの磁場、レーダーから電離層電場/電気伝導度、人工衛星からのオーロラ分布、人工衛星からの磁場データを用いて、地上100kmの電離層にかかっている電位の分布を計算できる。出力は、電場、電流、ジュール熱など約15種の物理量で、世界中に向けて発信する。このアウトプットを使い、たとえばアメリカのライス大学(ヒューストン)では、独自モデルを実行し、磁気圏内の荷電粒子分布を計算する。高エネルギー粒子が静止衛星に近づいている場合は、警報を発し注意を喚起する。また、このシミュレーションで得られる電位分布は、ただちに当研究所へ送り返され、次の時間ステップへの条件となる。

また、オーロラから発生するジュール熱は、超高層大気を膨張させ、風系を変え、構成成分へも影響を及ぼすことがわかっている。私たちの出力が、アメリカ国立大気科学研究所やミシガン大学の大気理論モデルへの入力になり、世界中の熱圏中性風の計算が行なわれ、その結果に基づいて予

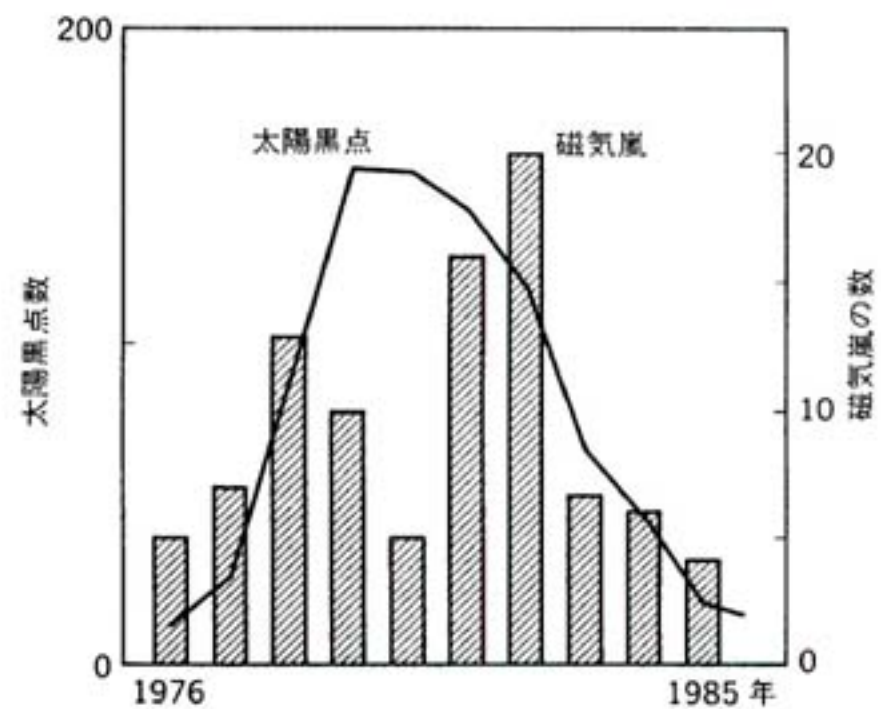


図4 太陽活動度と全磁気嵐の発生数(W. D. GONZALEZ提供)。一つの太陽活動サイクルの中に、二つの磁気嵐ピークがあることがわかる。図は第21太陽活動周期について、 $D_{st}$ が100ナノテスラより大きい磁気嵐を示す。 $D_{st}$ 指数は、磁気嵐のとき地球の回りにできる環状電流の強さを表わす。

報が発せられる。宇宙空間の温度/密度の変化が、人工衛星の軌道を変え、寿命をはやめたりすることがあるからである。

#### 宇宙天気 of 長期予報と短期予報

ちょうど地上の天気予報に長期/短期予報があるように、宇宙天気にも両者がある。図3は、太陽の活動度(黒点の数で表わす)に11年周期があること、しかも来年中に現周期のピークに達することを示している<sup>(4)</sup>。同時に示したのは、太陽フレアやCME(質量大放出)によって発生した磁気嵐の数である。両者の高い相関が、みてとれる。しかし、図4にあるように、一つ一つの太陽活動サイクルと、コロナホールによっておきる磁気嵐を含めた全磁気嵐の数を詳細にみると、話はそう

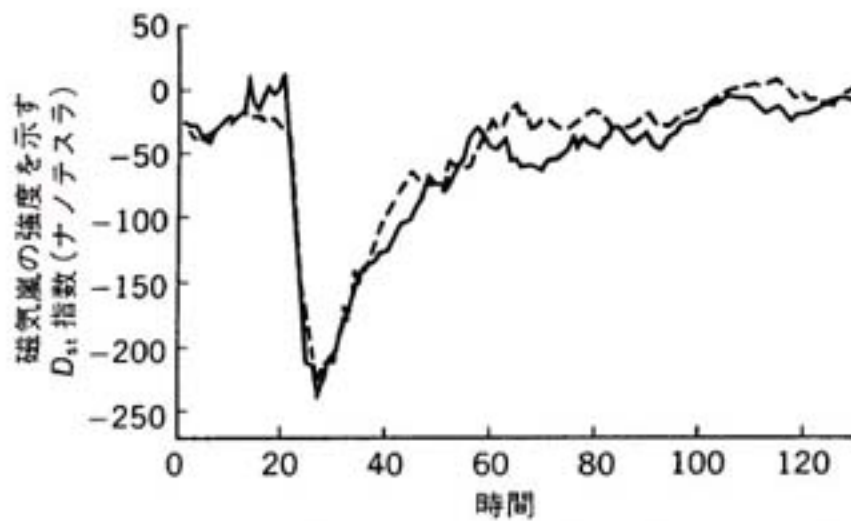


図5 人工知能を使った磁気嵐の予報の例(J.-G. Wu氏提供). 点線は人工知能による太陽風データを使った予測, 実線は実測の $D_{st}$ 指数を示す.

簡単ではない. 一つの11年サイクルの中に, 実は磁気嵐発生のピークが二つみえる. つまり, 太陽活動度が高くなりつつあるときに一つのピーク, そして活動が減衰しつつあるときにもう一つのピークが現われるという具合である<sup>(5)</sup>. ということは, 太陽活動度が高いときだけオーロラが活発になるわけではない.

では磁気嵐の発生, 発達を刻々と予報することはできないのだろうか. つまり, 宇宙天気の短期予報である. 図5は, 最近の人工知能技術を使った磁気嵐の予報スキームの一例である<sup>(6)</sup>. つまり, 何万時間にも及ぶ実データ(この場合, 太陽風と地球磁場変動のデータ)を使って磁気嵐のパターンをコンピュータに学習させ, 予報に役立てようというのである. この例では, 2時間前までの太陽風の密度, 速度, 磁場のデータを使えば, 磁気嵐のとき磁気圏に流れる環状電流の変化をみごとに予報できることを示している.

21世紀には, 宇宙ステーション計画などにみられるように, 人間の活動の場が宇宙にどんどん広がっていく. せっかく人間にはこの平和で住み

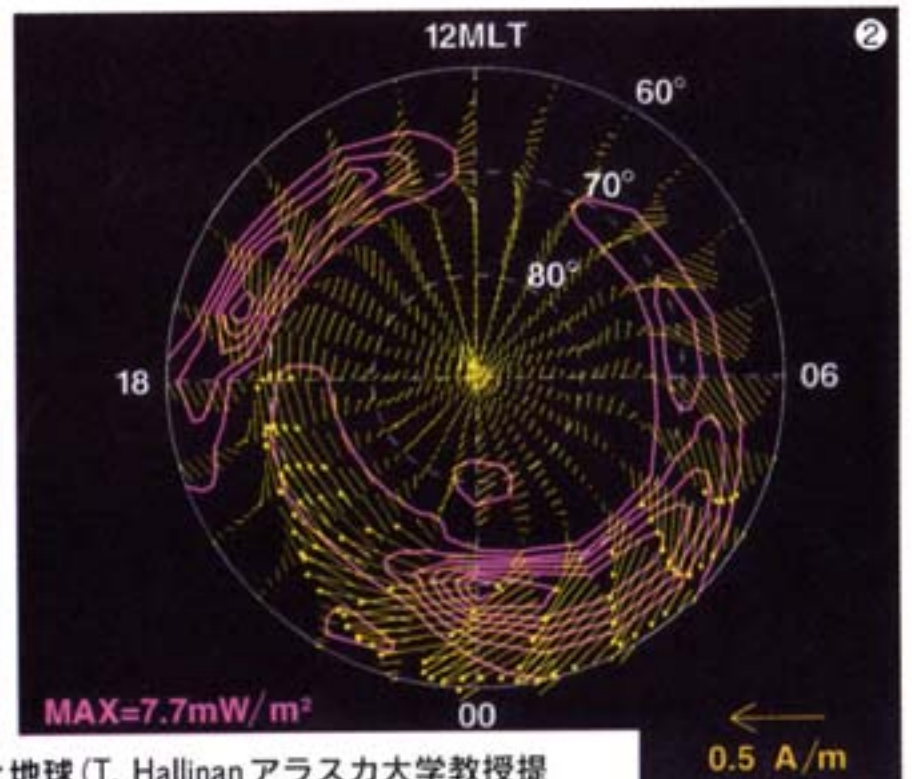
よい環境が与えられたにもかかわらず, わざわざ人間の生活に適さない宇宙へ出ていこうとする. “もっと速く, もっと遠くへ”という人間の知的好奇心から発し, 私たち生命がどこからきたかを探っているからである. 人が宇宙へ出ていくようになれば, 宇宙の過酷な状態を知らなければならぬし, 日常生活に入り込んだ今のコンピュータ時代を維持したいのであれば, 宇宙天気の予報をすることは私たちに課せられた重要なテーマである.

天気予報, 地震予知, オゾンなどの環境予測の場合と同じように, 理由はよくわからないが, 観測の統計から得られた, いわゆる経験則が宇宙天気の予報に大いに役立つ. しかし, 宇宙環境の真の定量的予報ができるようになるには, 太陽活動の原因, 太陽風と地球磁気圏の相互作用, 磁気嵐, オーロラの発生機構など, 太陽-地球間現象の基礎的理解が必須である.

#### 文 献

- (1) The National Space Weather Program, The Strategic Plan, FCM-P 30-1995, Washington, D. C.(1995)
- (2) 通信総合研究所季報, Vol. 43, No. 2, 郵政省通信総合研究所(1997)
- (3) T. TSURUTANI et al. eds.: Magnetic Storms, American Geophysical Union, Washington, D. C. (1997); G. L. SISCOE: Nature, **390**, 448(1997); Y. KAMIDE et al.: J. Geophys. Res., **103**, 17705(1998)
- (4) H. E. COFFEY: Solar-Geophysical Data, Prompt Report, National Geophysical Data Center(1999)
- (5) W. D. GONZALEZ et al.: Planet. Space Sci., **38**, 181(1990); E. W. CLIVER et al.: J. Geophys. Res., **101**, 27091(1996)
- (6) J.-G. WU & H. LUNDSTEDT: J. Geophys. Res., **102**, 14255(1997)

## 宇宙の天気とはなにか 上出洋介



①スペースシャトル“ディスカバリー”から撮ったオーロラと地球(T. Hallinan アラスカ大学教授提供)。ニュージーランド上空で撮影。中央付近に見える明るい星はシリウス。地平線と薄い大気の層が見える。②オーロラの中を流れる電流(黄色の矢印)と、オーロラから出る熱量(赤)。上方が太陽の方向、緯度は地磁気緯度である。西向きオーロラ電流は、真夜中で一番強く、東向き電流は夕方を中心に流れている。ジュール熱は、必ずしもオーロラ電流と高い相関があるわけではない。