



名古屋大学 太陽地球環境研究所

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/>

October 2003

STEL Newsletter

No. 34

電波星のまたたきから太陽風を予報

徳丸 宗利（太陽圏環境部門）

はじめに

宇宙から電波がやって来ることに人類が気づいたのは、今から約70年前のこと。その宇宙電波には、雲のように広がった方向から来るものもあれば、星のように点に見える方向から到来するものもあります。後者のことを、電波星と呼びます。但し、電波星の正体は必ずしも1個の星ではなく、遙か遠くにある星の集まり（銀河）だったりします。さて、1950年代に英国のA. Hewish博士らは電波星の観測を行っていたところ、電波星の信号の強さが短時間で激しく変化することを発見しました。その強度は、電波星の方向が太陽に近づくにつれて増加し、遠ざかるにつれて減少していました。このことからHewish博士らは、観測される強度変化が電波星自体によるものではなく、太陽の近傍を電波が通過する際に生じる“またた

き”現象（シンチレーション）であると結論しました。夜空の星をながめるとチカチカとまたたいて見えますが、これと同様なことが電波星にも起きていたのです。目で見える星の“またたき”は地球大気の揺らぎによって生じますが、電波星の“またたき”現象は太陽から吹き出す電離したガス（プラズマ）の流れが原因です（図1参照）。このガス流を太陽風と呼びます。

本稿では、太陽地球環境研究所で行っている電波星の“またたき”現象（電波星シンチレーション）の観測から、地球へ到来する太陽風を予報する研究について紹介します。

太陽風と宇宙天気

太陽系の惑星と惑星の間（惑星間空間）は、物質が何も存在しないように見えますが、真空ではなく、太陽風のプラズマで満たされています。太陽風の流速は、非常に速く、毎秒300－700 km。太陽風中の音速は地球付近で毎秒50 kmぐらいですから、太陽風は超音速の流れです。また、太陽風は変動に富んでいることも特徴です。人工衛星で観測される太陽風のデータを見ると、その流速や密度は絶えず変化しているのが分かります。時には太陽表面で発生した爆発現象によって毎秒1000 km以上の暴風が発生し、惑星間空間を駆け抜けてゆくこともあります。

超音速の太陽風は地球にも容赦なく吹き付けているのですが、地球の磁場がバリアーの役目をするので、太陽風が地球の大気と直接ぶつかり合うことはありません。地球周辺の宇宙空間には、地

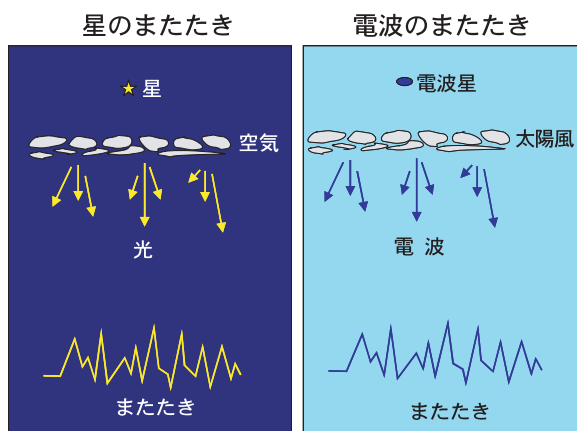


図1 星のまたたき現象と電波星のまたたき現象

球磁場で守られた領域ができています。しかし、その領域も完全に太陽風の変動から遮断されておらず、太陽風の息遣いを反映して状態は時々刻々変わっています。もし先に述べたような太陽風の暴風に地球が出くわすと、地球周辺の宇宙に激しい擾乱（空間の状態が激しく乱れること）が発生することもあります。

この擾乱に、最近、社会的な関心が寄せられています。それは、宇宙の擾乱によって気象衛星や放送衛星などに障害が発生したり、カーナビ（GPS衛星による）の精度が悪くなったりするからです。これらの人工衛星によるサービスは、今の私たちの生活にとって無くてはならないものであり、私たちはもう地球周辺の宇宙の状態に無関心ではられません（宇宙は私たちの生活圏の一部なのです）。宇宙擾乱の影響は、人工衛星によるサービスだけでなく、地上の電力線設備や海底ケーブルにも及びます。実際に大規模な停電事故が起きたこともあります。

私たちの生活を脅かしかねない宇宙の擾乱に対して、地上の天気のように予報できないかと考えるのは当然のこと。最近では、地球周辺の宇宙の状態を宇宙天気と呼んで、精度よく予報するための研究が世界中で盛んに行われています。宇宙天気を大きく左右するのは太陽風ですから、地球に到来する太陽風の変動をいち早く知ることが重要です。このため、現在では地球の上流の太陽風に人工衛星が送り込まれ、変動の監視が常時行われています。この人工衛星のいる場所は太陽と地球の重力が釣り合う特別な地点（L1地点）なので、太陽風中に留まって連続観測することが可能です。

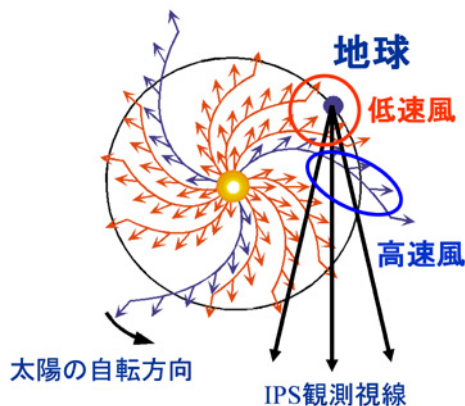


図2 黄道面を流れる太陽風を北側から見た図。IPS（惑星間空間シンチレーション：電波星シンチレーション）観測によって地球へ到来する太陽風を前もって測定することができる。

電波星シンチレーションによる太陽風観測

電波星シンチレーションは、地上から太陽風を探ることのできる便利な手段として研究に使われてきました。例えば、複数のアンテナで電波星シンチレーションを観測すれば、電波星の方向を横切って流れる太陽風の流速を求めることができます。また、シンチレーションの大きさから、電波星の方向に沿った太陽風の濃さに関する情報を得ることもできます。当研究所では、国内4ヶ所（富士、菅平、木曽、豊川）に大型アンテナを設置して、電波星シンチレーションによる太陽風の観測を実施しています。この観測は、雪でアンテナが駆動できない冬期間を除いて、毎日連続して行われています。

しかし、今は人工衛星が太陽風を常時観測しているので、電波星シンチレーション法のように間接的な測定をしなくてもいいように思われがちです。実は、電波星シンチレーションによる太陽風の観測は、人工衛星にはない優れた点がある点があって、太陽風の研究において未だに重宝がられているのです。特に宇宙天気の予報という観点から、電波星シンチレーションによる太陽風観測には魅力的な点があります。それは、太陽に近い場所における太陽風を観測できることです（図2参照）。太陽に近い太陽風の情報が得られれば、地球に到来する太陽風の変動をより早く知ることができます。私たちの行っている電波星シンチレーションの観測からは、数日先の太陽風の変動を予報することが期待できます。一方、太陽風を監視している人工衛星の場合は、太陽－地球間の距離の約1/100だけ地球の上流なので、約1時間先の太陽風が予報できるに過ぎません。

計算機トモグラフィを応用した太陽風予報の実験

私たちは、日々集まってくる電波星シンチレーションのデータを使って、地球に到来する太陽風を予報する実験を数年前に開始しました。この実験は、カリフォルニア大学サンディエゴ校(UCSD)のB. Jackson教授らのグループと共同で行っています。

電波星シンチレーション観測が太陽風の予報に有利であることは、以前から知られていたのですが、これにはある問題があって、精度よく太陽風を予報できませんでした。その問題とは、シンチレーション観測によって得られる値が、電波星の方向にあるいろいろな太陽風の情報を含んでいる

ことです。このため、従来のシンチレーション観測データと人工衛星で測った太陽風のデータを比較すると、シンチレーションのデータは変動が小さめになる傾向があり、場合によっては両者に大きな食い違いが生じていました。

私たちは、計算機トモグラフィ（CT）と呼ばれる手法をシンチレーションデータの解析に応用することで、この問題を解決することに成功しました。CTは、超音波で体内を診断する技術として医療分野での応用が有名です。CT解析法の開発により、シンチレーション観測データから人工衛星の測定値に劣らない精度で太陽風の速度や密度の分布を決定できるようになりました（詳しくは、STELニュースレター1999年10月号の巻頭記事「惑星間空間シンチレーション観測の高精度化」（小島正宜）を参照）。

太陽風予報の実験では、シンチレーション観測データをリアルタイムで処理できるようにCT解析法の改良を行いました。また、観測装置についても自動化や処理速度・信頼性の向上を図りました。これらの準備が整った2001年度の秋に実験はスタートし、現在も継続中です。実験では、シンチレーションデータを迅速にCT解析することで、地球へ到来する太陽風の速度と密度を求めています。どれだけ先まで予報ができるかは、日々得られるシンチレーションデータの数や質、電波星の分布によって変わりますが、観測が正常に行われた場合、約2～4日先まで予報値が得られます。実験では予報精度を評価するため、米国の太陽風監視衛星（ACE衛星）の最新のデータをインターネットから定期的に入手し、予報値との比較をリアルタイムで行っています。その結果から、速度については、 $\pm 50 \text{ km/s}$ 以内の精度で予報できることが確かめられました。密度に関しては予報精度が悪いようで、今後改良する必要がありますでしょう。予報結果はWebページ（<http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/forecast/>）にリアルタイムで公開されていますので、興味のある方はインターネットからアクセスしてみてください。

図3には、私たちの実験で高速太陽風の到来を数日前に予報できた例を示します。図中上段のグラフは2002年10月14日16時UT（世界標準時）の太陽風予報で、太陽風速度が増加するという結果が出ていますが、これが的中したことが17日16時UT（図中下段のグラフ）におけるACE衛星データとの比較から分かります。

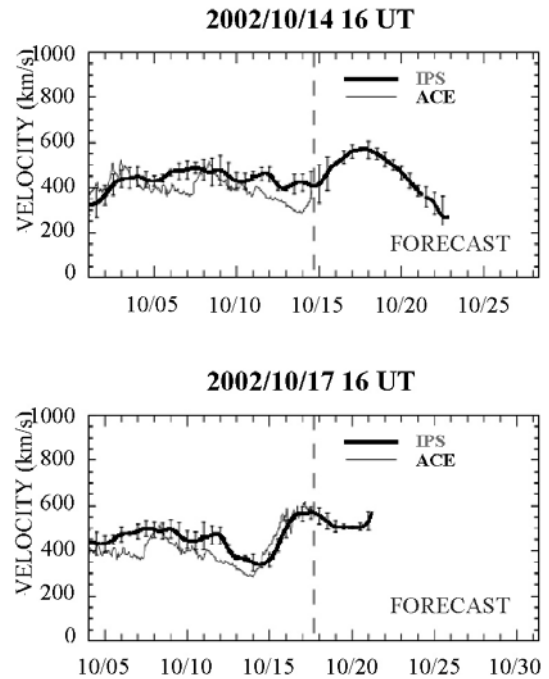


図3 IPSデータのCT解析によって得られた太陽風速度の予測値（太線）とACE衛星で観測された太陽風速度データ（細線）。解析した時刻は図中の点線で示されており、点線より右側が予報に相当する。

今後の課題

本実験の目的の一つは、電波星シンチレーションデータのCT解析が太陽風の予報に有効であることを示すこと。そして、もう一つ重要な目的が、実験結果に基づいて解析方法を改良してゆくことです。日々の検証を通じて、私たちの使っているCT解析法の問題点が浮き彫りになります。それを改良することで、より正確に太陽風の3次元構造を解析することが可能になり、さらには太陽風の謎解きに役立つことになります。

CT解析法では、太陽風の運動と相互作用を方程式で表現する必要がありますが、どんな方程式を使ってそれらを簡潔かつ正確に表現するかが、CT解析法を改良するポイントの一つです。現在、太陽風予報に用いているCT解析法では比較的単純な方程式を用いていますが、より複雑な方程式を用いることで高精度化することが期待されます。最近、私たちの研究グループでは電磁流体力学（MHD）の方程式を組み込んだ新しいCT解析法を開発しました（詳しくはSTELニュースレター2001年8月号の巻頭記事「太陽風の速度構造を探る」（林 啓志）を参照）。MHD－CT解析のいいところは、太陽風の速度、密度だけでなく、磁場の情報も出せること。太陽風の磁場は、宇宙天気をコントロールする重要なパラメータです。目

下、このMHD－CT解析法をリアルタイムで動かしてテストを行っており、解析結果はインターネットから見るができます（アドレスは、<http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/mhdtomo/>）。現在のバージョンのMHD－CT解析は、ゆっくりと変化する太陽風を対象にしており、惑星間空間を駆け抜ける暴風のような成分はうまく扱うことができませんが、将来は短時間の変動現象も扱えるようにしたいと思っています。

CT解析法の改良と同時に、電波星シンチレーションデータの量的・質的な改善も、正確な太陽風予報を実現する上で重要です。即ち、1日のシンチレーション観測から得られる良質なデータの

数が多ければ多いほど、正確な太陽風予報が可能になり、より細かな時間変動も予報できるようになります。それには、高感度な観測システム（アンテナ）が不可欠です。私たちは、日頃から観測システムの感度の向上に努めてきましたが、現有システムの感度向上はもう限界で、これ以上の高度化は望めません。そのため、私たちは太陽圏イメージング装置と呼ばれる電波星シンチレーション観測専用の大型アンテナを新たに建設することを計画中です。これが完成すれば、1日に観測可能な電波星の数は約3－5倍に増えると予想され、太陽風予報の精度もそれに比例して大幅に改善されるでしょう。

太陽活動極大期の太陽風構造

藤木 謙一（太陽圏環境部門）

太陽はいつも変わらぬ姿で穏やかに私たちを見守ってくれています。しかし、太陽を観測すると、活発に活動する極大期と、静かな時期にあたる極小期を繰り返していることが分かります。その活動周期が11年であることはよく知られていますが、その周期で太陽から吹き出すプラズマ流（太陽風）の速度分布（速度構造）もその姿を大きく変えています。1990年代に入り、探査機などによる飛翔体観測や、アンテナなどを使っての地上観測により、太陽風の速度構造についての研究が飛躍的に進みました。その理由の一つに、探査機ユリシーズの活躍があります。ESA（European Space Agency）が打ち上げたこの探査機は、太陽の周りで楕円軌道をとっています。これが黄道面を脱出し、太陽緯度の南極から北極にかけて（S80°－N80°）の観測に成功したことで、大きな成果が生まれました。そしてもう一つは、地上観測によるデータ処理法が進歩したことです。これにより、精度の高い太陽風の速度構造が得られるようになりました。

巻頭記事で太陽風の予報について紹介しましたが、この記事では、太陽活動極大期に注目しながら、複雑で変化の速い太陽風の速度構造について、紹介したいと思います。

太陽風を地上から観測する

惑星間空間シンチレーション（Interplanetary Scintillation: IPS）と呼ばれる電波星の“またた

き”現象を地上の離れた2点で観測することにより、太陽風の速度が求められること、そして、私たちの研究室では、コンピュータモグラフィ（CT）と呼ばれる画像処理法を応用し、精度の高いIPS観測が可能になったことは、巻頭記事で紹介しました。

このCT法を適用するには、観測期間中（この場合27日間）に、太陽風の構造が変化しないという必要条件があります。太陽活動の静かな時期は、この条件は満たされているのですが、太陽の活動が盛んになると、太陽コロナの構造は、動きが激しくなり、太陽風の速度構造もそれに伴い変

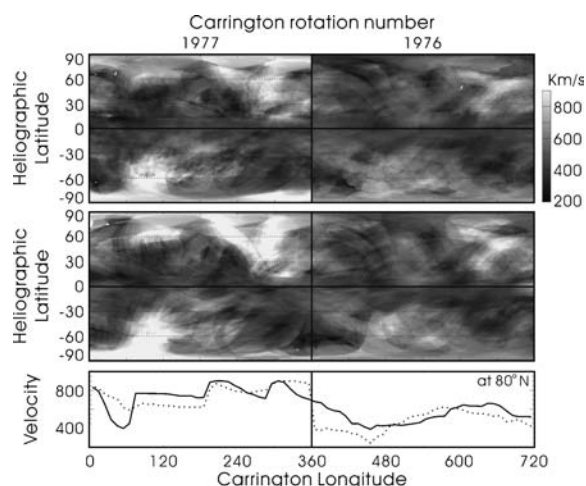


図1 従来の方法（上段）と改良版（中段）の像処理の比較、および80°Nで切り出した速度プロファイルの比較（下段）。従来の方法で見られた360°付近の不自然な速度差（点線）が、改良版（実線）ではなくなっている。

化してしまうので、必要条件を満たすことができません。

従来のCT法では、太陽の自転周期のデータごとに処理をしています。速度分布は太陽の経度方向に0°から360°に広がる2次元平面像として求められます。しかし、実際には球面であるため0°と360°は接しているわけです。0°付近と360°付近の観測視線は、観測時期が約1ヶ月違うため、従来のCT法を太陽活動極大期のデータに適用すると、誤差を大きくする危険性があります。そこで、求める2次元平面を0°から360°、そして次の周期に移り720°と、一自転周期に限るのではなく、経度方向に連続する画像としてデータを取り扱おうとします。すると、前述の観測時期の違いによって生じるCT法の誤差は小さくなるのが期待できます(図1参照)。

太陽風の速度分布の変化

さて、IPS観測を実際にCT法で解析した、太陽風の速度構造をご覧にしましょう。図2は太陽活動極小期(1995年)と太陽活動極大期前後(1999-2002年)の太陽風の構造です。1995年と2000年を比較すると、太陽風の速度構造が太陽活動度によって驚くほど変わっているのが分かります。1995年の太陽風は低緯度に赤色で表される300-400 km/sの低速風の細い帯があり、高緯度

の水色で表される700 km/s以上の高速風と接しています。これは不思議なことで、太陽活動極小期には、太陽風は、低速風と高速風の2成分から成ることを意味し、太陽風の2態構造と呼ばれています。なぜ太陽風の加速がこのような2種類の太陽風を作り出すのかは、太陽風加速機構の難題でまだ解決されていません。また、1999年のデータを見てみると、太陽活動の上昇に伴い、低速風の赤色の帯が高緯度側に広がっているのが分かります。そして、2000年の太陽活動極大期には極域から青色で表される高速風は消失します。

それでは今回の極大期前後(1999年-2002年)、太陽風分布はどのような変化をしたのか見ていくことにします。(各年の間に4自転周期分の開きがあるのは、冬季の観測中断によるもの。灰色の部分ではデータが不十分であるため、速度分布が得られなかった領域を表します。)1999年のデータを見てみましょう。キャリントン自転周期※1950(CR1950)までは北極域に青色で示される高速太陽風が観測されていますが、CR1951-1952にかけて北極域の高速太陽風は消失しています。太陽コロナ中の磁力線を計算すると、確かにCR1952以降は北極域からの開いた磁力線がなくなっており、極域の高速太陽風の源であるコロナホールが消失していたと考えられます。一方南極域の高速太陽風は少なくともCR1952の時点では

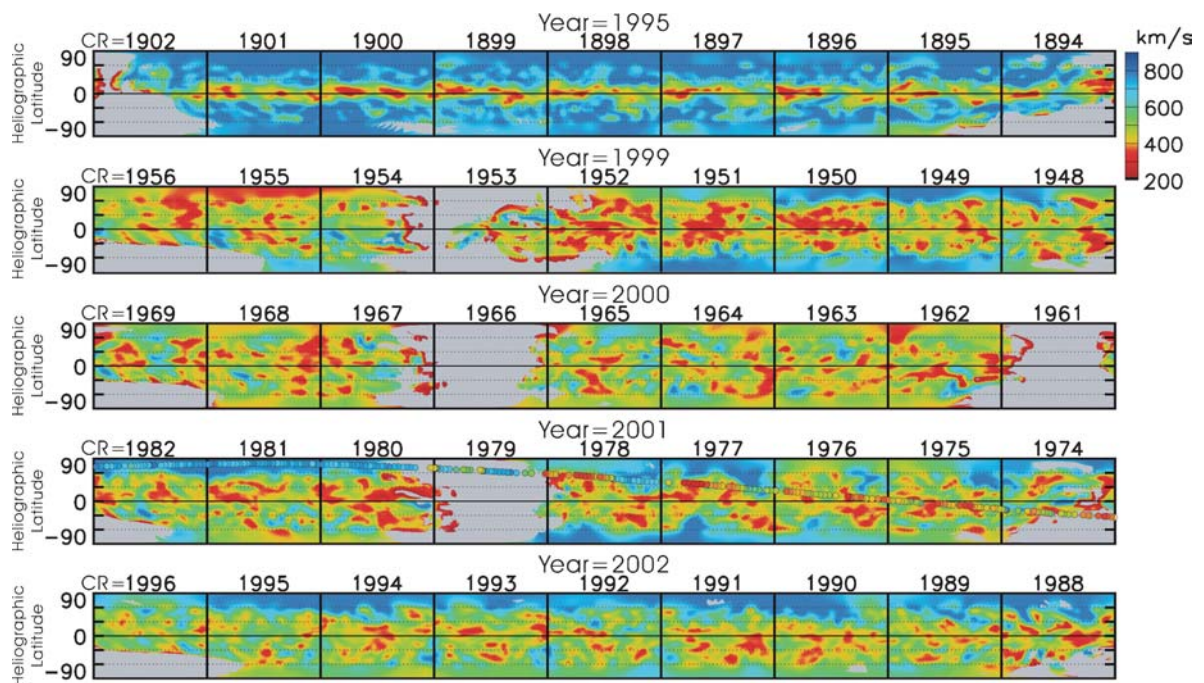


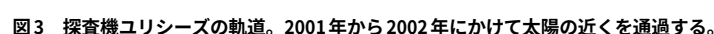
図2 IPS観測により求めた1995年および1999年-2002年の太陽風速度構造の変化。各年の帯状のデータは9ブロックに分かれており、各ブロック上の数字は、キャリントン自転周期※(CR)を表す。各周期毎の横軸は、キャリントン経度(太陽経度)0-360度を表す。○印は探査機コリシーズが観測した太陽風の緯度経度位置を表し、色は速度を表す。

※イギリスの天文学者 R.C.Carrington が太陽黒点を観測し、明らかになった太陽自転数。
1回自転する度に、一つずつ数字が増えていく通し番号がついている。

それでは2001年のIPS観測データは、どうなっているのでしょうか。観測が開始されたCR1974の時点で、すでに青色の帯が見られ、高速太陽風が出現していることが分かります。そして、その分布はCR1975には特定の経度に偏り、CR1976になるとまた消失します。そしてCR1977以降は極域高速風は安定して存在しています（CR1979は落雷の被害により観測中断）。図中の色つき丸印は、ユリシーズの軌道を2.5太陽半径の球面に投影したものです。この比較からユリシーズの観測した高速風の奇妙な出現・消失の振る舞いは、時間的な変動ではなく、特定の経度に偏って分布す

今回の太陽活動極大期前後の太陽風速度構造の特徴は、極域高速風の消失・出現を見ても分かる通り、北半球が先行していたといえます。面白いことに、前回の極大期（1989－1990年）の前後でも、同じように北半球が先行しています。この非対称性は極域高速風の源とされるコロナホール生成の非対称性、ひいては太陽内部の運動に起因するものでしょうから、非常に興味ある問題です。また「極大期の太陽風速度も2態構造か否か？」という問題を考えると、2000年の速度分布から、「否」という答えが出ているように見えます。実際にそう主張している研究者もいますが、複雑な吹き出し方をしている太陽風は、惑星間空間で相互作用をして速度が変わってしまう可能性があり、まだ結論づけることはできないと考えています。今後、加速が終了した領域である数十太陽半径あたりのIPS観測を重点的に行うことで、加速そのものが2態構造になっているかどうかが明らかになるでしょう。

今回、IPSデータ処理法に改良を加えて求めた太陽風速度分布を、探査機のデータと比較した結果、太陽活動極大期においても十分に精度の高い解析が行えるということが明らかになりました。前述したように、探査機の観測のみでは不確定な問題が、IPS観測との比較により解決することが



あります。すなわち、時間・空間分解能には優れている探査機の観測が、一点観測であるのに比べ、IPS観測は時間・空間分解能は劣りますが、3次元的な観測が短時間に行える特長があります。この2つは、相互に欠点を補い合う相補的な関係にあるのです。実際に2001年のIPS観測とユリシース観測の比較は、この相補関係を活かした研究

の有効性を示すものであり、太陽風の研究者たちに驚きをもって受け入れられました。我々のグループは、より精度の高い観測を行うために、大型アンテナの建設に向けて基礎研究を行っています。この大型アンテナでは、現在の数倍の電波星を観測することを目標にしており、より高い空間分解能で観測が行えると期待されます。

Consistency が要求される時代

上出 洋介（所長）

今はやりのmanifestoを始め、availabilityとかcomplianceなど、“よく耳にするのに日本語にするのが難しい”単語があります。Consistencyもその一つでしょう。英和辞書で引くと、「自己矛盾しないこと」と出てきます。信念や見識という言葉ほど重くはありませんが、今は大学人としてconsistencyが強く要求される時代だと思います。

「政策論議」と「身近に迫った選挙に勝つための方策」に例を見るまでもなく、私たちの周りは矛盾で溢れています。人間で出来ている世の中である限り、大学も例外ではありません。大学附置研究所の目指すことと、全国共同利用研究所が負っている役割を、今こそ原点から見直すべきだと思います。「理想と現実の違い」と逃げている問題ではありません。友人に頼まれたからとか、研究費が得られそうだからという研究テーマ／予算／人事の選択は、およそinconsistentな結果を生みます。積み上げてきた議論に逆行する意見を主張することも、consistentとは言えません。

平成8年の行政改革会議から始まった国立大学法人化の議論は、さる7月の参議院での「国立大学法人法」の成立をもって一段落し、来年度より個々の大学法人になることが事実上決まりました。昨年3月の「国立大学等の独立行政法人化に関する調査検討会議」最終報告など、国会内外での様々な論点からの議論を経て、日本の大学の歴史にかつてなかった活性化改革への第一歩が踏み出されたわけです。

“国が設立し、国が財政措置の責任をもつ”がために要求される大学の長期展望や中期目標の策定に絡み、業績評価や資源配分で慎重な対応、つまり短絡的評価を避けることを求める人も少なくありません。それは、「国立大学の評価に当っては、基礎的な学問分野の継承発展にも十分配慮すること」など、参議院でのいくつかの附帯決議にも反映されています。実際、太陽地球系科学は“太陽圏から大気圏まで”を“融合的”に扱う領域横断的な学問であるだ

けに、最先端の研究を遂行していく中で、初めの思惑と違った方向へ動くことは当然考えられることです。だからといって、中期計画を“結果が見える”範囲に小ぶりに書いたり、中間評価を不安に感じたりする必要のない性質のことだと思います。研究計画の変更が必要になった場合、その理由を述べて堂々と変更すればいいだけのことでしょう。決してconsistencyに反しません。

大学環境変革のこうした動きと併行して、大学附置研究所の見直しも進みました。昨年10月、科学技術・学術審議会／学術分科会に、法人化後の大学附置研究所の在り方を検討する特別委員会が設置され、本年4月の最終報告書に至るまで、急ピッチで厳しい審議が行われました。全国研究所長会議での活発な議論の中には、必ずしも「現状維持」を支持するものだけとは限りませんでした。報告書には、大学の中期目標に明確に位置付けられる中核的研究拠点としての附置研の重要な役割が書かれています。とくに全国共同利用の附置研に関しては、全国連携利用に関わる経費を運営費交付金として確実に配分することなどが記されています。

附置研の今後については未だ流動的な要素が多く、この原稿を書いている時点では、研究所内の部門構成などについては、大学内で任意に変更ができ、文部科学省への届け出さえも不必要になると聞いています。今後の附置研の統合／再編成などに関しては、学術分科会の基本問題特別委員会で引き続き審議が行われていくという理解です。附置研のポテンシャル、競争力そして成果が、“見える形で”問われることになる新型の競争的研究費が、来年度の文部科学省からの概算要求に盛り込まれています。今までの所長リーダーシップ経費が姿を変えた予算です。当研究所が提出した中期目標・中期計画には、現在各部門で行われている研究テーマの自然な延長に加え、存置目的とconsistentな、「太陽活動と長期気候変動の関係」や「比較惑星研究」も加えました。