

予報か，基礎研究か

地球科学の宿命

上出洋介

かみで ようすけ

名古屋大学太陽地球環境研究所

地球科学は、私たち人類が住んでいるこの星をよりよく理解しようとする基礎科学であると同時に、自然災害の予報を社会から要請されている応用の学問でもある。自然現象の予報が大事か、あるいは基礎研究が大事かは、二者択一の問題ではない。かといって、基礎研究側と予報側が、勝手に両サイドで研究をしていけばいいというわけでは断じてない。本稿では、この地球科学のもつ二面性を、研究の方法、評価、資源配分、国際共同の角度から議論する。

「明日の遠足，晴れてくれればいいけど」

「今度の台風は日本直撃かも知れない」

「ひょっとして，この微小地震は大地震の前触れかな」

「富士山が，最近にわかには火山活動を開始したらしい」

「オゾンホールは，北半球でもじわじわと拡大しているらしい」

「確か子供の頃は，地球寒冷化と聞いていたが，今の温暖化はいつまで進むのだろう」

「すばらしいオーロラが，今晚も出現してくれるだろうか」

「ミール宇宙船の軌道がずれてきているようだが，いつ大気圏に突入するのだろうか」

「昨夜，成田空港の管制室で，航空機との通信が断続的に悪くなったそうだ」

私たちがよく耳にする，自然現象と生活に関わる日常会話である。さまざまな現象に対応して，気象学，海洋学，陸水学，地震学，火山学，環境科学，超高層物理学と，専門分野が分かれている。一見ばらばらのように思われるかも知れないが，実はいずれの現象も，太陽と地球の間の微妙なバランス関係に起因する自然現象で，発生機構や発達形態には多くの共通点がある。自然の猛威はしばしば人間の生活に大被害を及ぼすが，私たちにとって大きな変動でも，太陽-地球という自然のシステムにしてみれば，単に呼吸しているにすぎない程度，つまり地球は生きていくということを示す変動幅にすぎない。

示す変動幅にすぎない。

またこれらの学問を遂行するには，莫大な金がかかるという共通点もある。基本的に，自分達の住んでいる地球の全体を，国境を超えて理解しようという研究であるから，大型の国際協同プロジェクトを組まなければならない。インターネットの時代，世界中から膨大な観測記録が刻々と入ってくるし，歴史上のデータも大切な情報で，どこか共通の場所ですっかり保存しておく必要もある。常に最先端の技術を使った観測機器の開発，コンピュータネットワークの管理，そして発展途上国での観測体制の援助の必要性も，地球/宇宙科学のあらゆる分野に共通している課題であろう。

予報か，基礎研究か。どちらを優先させるべきか。これは，いま日本の地球科学界がかかえている大問題である⁽¹⁾。地震予知，天気予報，気候予測，地球環境の将来，そして宇宙天気の予報は，いまどのようなレベルにいるのだろうか。「自然現象はすべて神の為すわざ，予測なんておこがましいし，出来るはずはない」とあきらめてしまったら，私たち人間の予知能力はゼロであると認めることになる。その逆に，太陽と地球間のすべての物理過程が完全に理解されてしまったら，自然現象の100%予測が可能になる。つまり，現在の状態をコンピュータにインプットさえすれば，いつ何がどこに起きるかを，コンピュータが教えてくれるということである。いま私たちはこの両極端の間のどこかにいるはずであるが，どこに

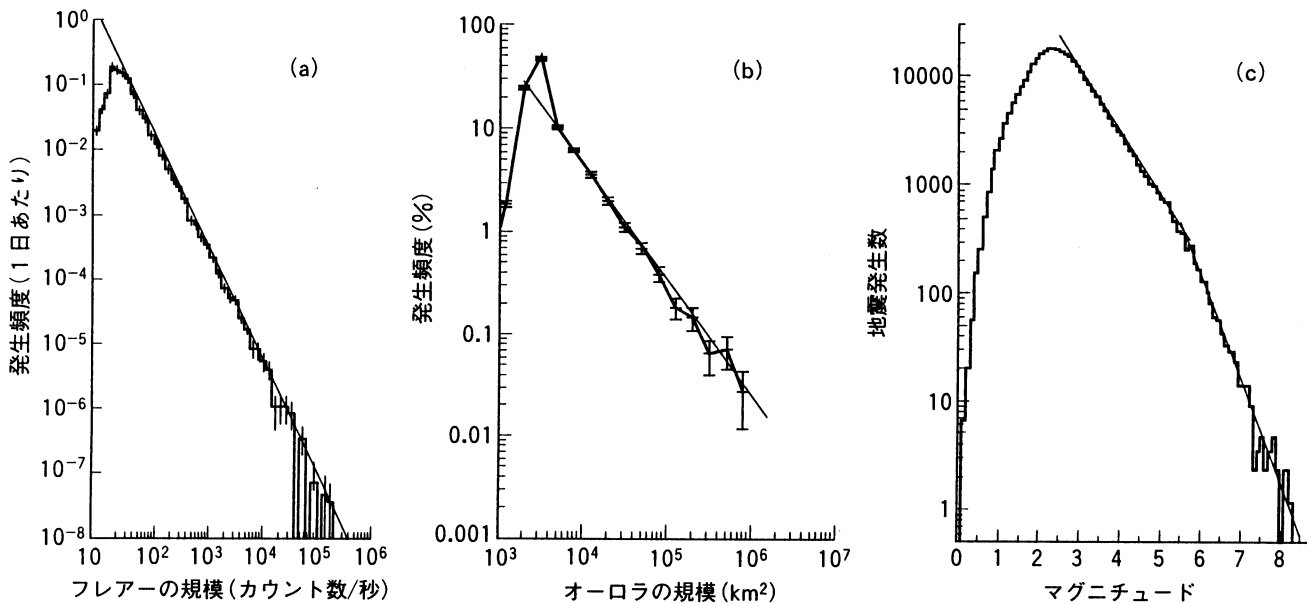


図1—自然現象に見る自己組織化臨界系の表われ。(a)太陽面爆発現象フレアーの強度分布。太陽観測衛星 Solar Maximum Mission (SMM)硬 X 線観測器で得られた 7000 個のフレアーについての統計⁽⁶⁾。(b)オーロラの頻度分布。人工衛星 POLAR による紫外線観測 8 万 1794 例についての統計。オーロラの規模(km²)について示す⁽⁵⁾。(c)1949~1998 年の 50 年間に、日本周辺で検知された全 29 万 9319 個の地震の M (マグニチュード)分布(気象庁のデータによる)。いずれの場合も、ある値(たとえば(c)では $M=3$)より小さな規模の現象発生数が直線より外れているのは、現在の観測機器では小さな現象を検知する能力が低いためである。

いるのか誰にもわからない。どこにいるのかさえ、「神のみぞ知る」なのだろうか。

科学することは、一言でいえば、再現性を追求する人間の行いである。科学のあらゆる分野は、発見に始まり、再現に終る。ある現象に関わるすべての条件が分かり、それらの条件下で発生する全プロセスが理解されたならば、その現象を再現することができるわけである。すなわち、学問がそのレベルに達すると、予報もできることになる。発見と再現の間に、モデリングに基づく試行錯誤を通しての、研究者の弛まざる努力がある。

言い換えれば、自然現象の予報・予知は科学者の夢なのである。では、現在の私たちのように、全プロセスを完全に理解していない状態で、地球科学に携わる研究者あるいは社会はどうすればいいのだろうか。これは、基礎科学に傾注するか、予報に励むかの二者択一の問題ではないことは明らかであろう。

基礎研究か、前兆現象のキャッチか

予報・予知は、確率の問題とは切り離して議論できない。地震でも太陽フレアーでも、規模の小さいものはしばしば起きるが、大きなものはたまにしか発生しない。この事実を私たちは経験とし

て知っているが、なぜそうなのかは、それほど自明なことではない(もっとも、大地震が毎日のように日本で発生したら大変なことではあるが)。エネルギーがどこか入れ物に貯えられて、それがいっぱいになったとき、まるでバケツがひっくり返るようにして、その自然現象が起きても何の不思議もない。そのようなメカニズムが正しいのならば、バケツの大きさに相当した大きさの現象がいつも発生するはずである。自然のエネルギー蓄積/解放も、仕組みはそんな簡単ではないらしい。

自然界には、「ある規模(放出エネルギーの大きさといってもいい)より大きい現象の発生頻度は、規模のべき関数的に減少する」という現象がたくさん見つかっている。数学的には自己組織化臨界系(Self-Organized Criticality System)と呼ばれ⁽²⁾、地震はその典型的な現象である。現象の大きさと発生頻度を両対数グラフで描くと、それらの関係は直線になる。地震学ではグーテンベルグ・リヒターの法則⁽³⁾として有名であるが、このような性質は太陽から地球までのいろいろな現象に見出すことができる(図1)。自然現象だけではない。経済破綻や航空機の金属疲労も、おそらくこの法則にしたがって起きている。もちろん、グラフ上で直線の傾きは、世界中一定ではない。たとえば、日本の地震とカリフォルニアの地震では、

バケツのサイズや材質が違うはずだ。

平面に砂粒を徐々に落して、円錐状の砂山を築いていくことを想定しよう。少しずつ砂粒を落していく途中で、部分的に「こらえきれなくなつて」砂の山が崩れることがあろう。構わずに砂を落していくと、どんどん山の傾斜がきつくなり、あるとき突然ドカーッと山のほぼ全体が崩れることがある。これが、大雪崩であり、大地震であり、見事なオーロラのブレイクアップ(爆発)でもある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。オーロラのふるさとである、太陽フレア自身の発生分布も自己組織化臨界現象であることが、最近分かってきた⁽⁶⁾。砂山が崩れるこのような思考実験は、数学で表すとまさに自己組織化臨界系のベキ関数になるのである。したがって、図2から、「マグニチュード x グラスの活断層地震が $\times \times$ 年以内に発生する確率は $\bigcirc \bigcirc$ %である」という予測が可能はずだ。

問題は、このような確率が示すことと、個々の事象の予知をどう区分して評価すればいいのかということだろう。自然現象の予知、予報というのは、その現象が「いつ」、「どこで」、「どれくらい」の大きさのものが発生するかを、「定量的に」予測しなければあまり意味がない。「1000年以内に、地球のどこかで地震が発生する」と発表しても、意味のある予報とはいいい難い。しかし、だからといって、「個々の地震は複雑、多様であり、それ故に予報はできない」と予報業務に対して厳しい判断を下し、図1に表れたベキ関数の背後にある物理を探る努力、つまり基礎研究のみを推奨していいのだろうか。ひとつひとつの事象(たとえば、個々の地震)が予知できなくても、与えられた条件下での発生確率が計算できれば、社会にとって大きな貢献であろう。確率はあくまで可能性として捉え、現実との間には常に誤差が伴うことを認識しなければならない。長期予報に、短期予報(つまり、直前予報)と同じ精度を要求してはいけないということでもある。

「確率など、占いと何が違うのか」と一般の人に批判されるかも知れないが、テレビでの雨の確率予報などは、毎日の生活に役だっているはずだ。また、自然が暴れて(つまり、地球システムが大呼吸をして)大災害に遭うのは人間の生活で

あるから、現象を予報することが社会から強く要求されている。つまり、科学者は太陽と地球の詳細なプロセス、地球の中で起きている物理/化学過程をまだ完全に理解してもしないにもかかわらず、社会からの要請で、現実には定量的な予報を下さなければならないのである。

防災対策の研究も緊急に必要であることはいうまでもない。7年前の阪神淡路大震災のとき、死者の半分以上は倒壊家屋の中で亡くなっている。ごく最近では、東海地震の防災対策強化地域の見直しが行われ、全部で263の市町村が指定を受けることになった。新しい研究結果に基づいて、地震発生の可能性のある地域が拡大されたのに加え、軟弱地盤や浸水の可能性、避難場所への不便さも、強化地域指定のファクターに入れられたからである。

地震でも台風でも、エネルギーが蓄積されて突然放出されるという典型的な自然現象である。しかし、両者の予知・予報の意味は、日本に住んでいる私たちにとって多少異なっている。地震は発生自体の予知を要求されているが、台風は、発生後の進路の予報が要求されることである。もちろん、大気科学の基礎研究では、台風のエネルギーが徐々に蓄えられ、そして突然うず巻が成長し、動き出すメカニズムに大きな関心があり、台風発生の前兆現象を発見することに興味がある点では、地震の研究(つまり、地球内部の基礎研究)と同じことではあるが、日本での防災という観点からは、違う姿勢が必要だ。

いずれにしろ、予報、とくに短期予報は、前兆現象(先行現象ともいう)の同定が大切なカギをにぎっている⁽⁷⁾。いったい私たちの知識は、これら身近な自然現象の理解に対してどれくらい近づいたのか。つまり、「同じ条件下では同じ現象が起きる」ことを仮定している科学研究が、私たちのまわりの自然現象のヴェールを剥ぐことにどれくらい成功したのだろうか。この問いに正確に答えるには、現象の時間スケールや規模、場所、さらに確率や予報の精度、その社会的影響を考慮に入れなければならない。検証/評価自体がそう簡単なことではない。

観測と実験の違い

—地球・宇宙科学の特徴

上に述べた地震学、大気科学、海洋学、宇宙空間科学などに基本的に共通している点は、一言でいえば、「人間がコントロールできない」自然現象を扱っているということであろう。実験室で行なう実験と異なり、地球や宇宙空間が相手では、温度や圧力などの実験条件を整えてから観測にかかるということができない。地震に「ちょっと待って」ともいえないし、人工衛星が都合のいい場所を飛んでいなくても磁気嵐は起きる。私たち科学者は、「一方的に与えられた」観測データの中に、意味のある普遍的な性質を見つけなければならないという宿命をもたされている。自然界では、どこかで多くの原因が重なり合ったり、結果が次の現象の原因になったり、という非線形過程なる厄介なことも起きている。簡単にいえば、その現象に「一番効いている」変数を探さねばならないということである。

地球科学では、現象発生メカニズムを解明するために、観測をもとに現象論的モデル(empirical model)を構築することが重要な手法である。多くのデータから、特定の現象(たとえば、大地震、火山噴火、オーロラ爆発)の発生を導くための矛盾のないストーリーをつくること、と言い替えることもできるかも知れない。しかし、難しいのは、いくつかの異なる原因がお互いに重なり合って、それらの現象が起きることがしばしばあることだ。また、ふたつの全く異なる原因が同じ現象、あるいは、「一見」同じ現象、を発生させることもある。何十万という人命が奪われた1976年の中国河北省の大地震(マグニチュード7.8)では、通常あるはずの小地震(前震)がなく、直前予知に失敗したという⁽⁸⁾。また、断層の動きがゆっくりなら、地震であることにも気付かない、いわゆるサイレント地震もある⁽⁹⁾。太陽フレアが活発で、惑星間空間が大荒れの状態であっても、地球磁場と太陽風磁場の結合度が低ければ、磁気嵐は発達しないのと似ている。ヌル(null、つまりゼロ)磁気嵐という。これらの点、つまり私たちに見えるようになった現象の背後には、人間が

知らない複雑なプロセスが隠されていることをわきまえるべきである。謙虚な気持でデータを見なければ、思わぬ自然の落とし穴に入り込み、バイアスのかかった結論に達してしまうことがある。ひどい場合には、自分に都合のいい解釈を導いてしまうことにもなり、ときには自分の理論にとって都合の悪いデータを隠してしまうという、一種のデータねつ造になりかねない。

いずれにしろ、地球科学では、データが多ければ多いほどいい研究ができる、つまり金をかければいいデータが取れると言い替えることができないこともない。金のある人やグループは生きていける。しかし、厄介なのは、得られたデータのほとんどは自然のゆらぎ、ノイズ、つまり自然の単なる呼吸にすぎないということである。だから、しっかりした研究動機がなければ、観測は高価なおもちゃを使ってのお遊びになってしまいかねない。多量のデータをきれいなカラーで図示しているだけでは、各種のグラフを描くアルゴリズムは進歩するかも知れないが、本当の学問は発展しない。あまりに美しすぎて(つまり、仮定が非現実的で)観測データに合わない理論もいけないし、あまりにも無心すぎて、理論的予想なしのデータチェックだけでもいけない。正しいデータ解析という作業は、観測データ-モデル-理論の間を行ったり来たり、いわば試行錯誤の連続であるべきだ。

大事なものは、可能な最新の知識を使って、自然現象の予報をすることは、地球科学に課せられた仕事であるということ。しかし、「学界全体としてこの仕事をすればいいのだから、予報する人、基礎研究する人が別々にいればいい」という理屈は通じない。ちょうど、「研究だけする教授」と「教育だけする教授」が別々に存在しているのは、大学としての機能が成り立たないのと同じことである。主として基礎研究に携わる研究者は、その研究結果がいつ、どのような形で現象の予報に応用されるかを常に具体化させながら研究を進めなければならないし、観測や予報に従事している研究者は、データブックを報告書として出すだけではなく、観測データを常に基礎過程で説明できなければならない。

経験則とは

地球科学や宇宙科学の分野では、因果関係を全部理解していなくても、経験則を使ってある程度は自然現象の予報ができることがある。「夕焼けがきれいだったら、明日は晴れる」とか、「かみなりが鳴ると梅雨が明ける」というたぐいである。テレビで、人工衛星から撮った雲の分布を見ていれば、流体力学やナビア・ストークスの微分方程式を全く知らなくても、明日の天気ぐらいは大まかに当てることができる。新聞やテレビで見る天気図から気圧パターンの動きを毎日見ることにより、明日はどれくらい暑くなるのかだいたいの想像がつく。数多くの点で地殻の動きを観測していれば、複素関数論と偏微分波動方程式を習得していなくても、異常な振動をキャッチして地震の予測につながる。太陽黒点が増えると、なぜかはよくわからないが、オーロラが活発になり磁気嵐が発生する、というのも経験則である。

経験則がいつも正しければ、必ずそこには原因がある。経験則をもとに基礎研究が発展することは、歴史上にいくつも例があるからだ。南極上空にオゾンホールができることを観測したことは経験則であり、この経験則に基づいて、原因は「南極に特有のもの、たとえば南極大陸上層の極端に冷たい大気」ではないかという予想に進むのである。

最近、人工知能(Artificial Intelligence)技術を自然現象の予報に採り組むことが多くなった⁽¹⁰⁾。これは、コンピューターに、事例と原因らしき量の変動をたくさん学習させておき、どの量がどれくらい効いているかを判断させて現象の予報につなげようというものである。「風が吹けば桶屋がもうかる」式の、定量的議論を欠いた手法というニオイがしないでもないが、学習サンプルを多くすることによって、しだいに定量的議論ができるようになってきた。

経験則を構築するとき注意しなければならない点は、解釈には常に「広い視野をもつこと」である。オーロラは極地でよく見られるから、オーロラの発生は低い気温に関係するに違いない、という推論は間違っていた。オーロラは宇宙空間の現

象であるから、その発生は地上の気温には関係がない。静止衛星からの雲全体の動きを見てしまえば分かってしまうことであるが、その情報がない時代には、本州に置かれた数点だけの観測からは間違った経験則ができてしまいかねない。不連続線が日本列島の南にわずか100 kmはずれば、日本の天気に影響はなくなってしまうからである。極端に言えば、「昨日天気がよかった」(という経験)だけで、「地球上に不連続線はなかった」と結論できないということである。不連続線の本体が日本付近を通らなかったにすぎないのである。

可能な限りの変数を採り入れ、確率までを考慮に入れた経験則ならば、その原因を理論的に見つける努力自体が学問になる。しかし、科学的根拠なしに、完全に経験だけに頼っていては、狭いところからだけ見ているために、逆の予知をしてしまうこともあり得る。ここにも、経験則と基礎科学のバランスの大切さがある。

どこがおかしい日本の研究システム

実は、「予知か、基礎研究か」を議論するとき、避けて通れない問題がある。それは、私たち地球・宇宙科学に従事している者が日常経験していることで、「こんなことで本当にいいのだろうか。どこがおかしいのでは」と感ずることと関係がある。つまり、毎日毎日非常に忙しいということである。つまり、競い合っている外国の同業者と比べて、忙しすぎるのである。窓の外が明るいうちは、研究以外の事務をしていて日が暮れる。夜になってやっと、学生の話聞いてあげることができる。エネルギーが残っていれば、おもむろにデータを見るという生活が続く。私が論文を書くのは、ほとんどの場合、電話がかかってこない飛行機の中であるというのは、恥ずかしい事実なのである。コンピューターの技術者や有能な秘書をもつことがいかに大切かは、外国でしのぎを削って研究してきた経験をもつ人には、痛いぐらい分かることに違いない。

さらに、「和をもって尊し」の日本文化の通り、お互いに評価し合うことを嫌うし、せっかく評価をしても厳しさが無いのも問題だ。日本人は、国

際学会での議論に弱い。これは、地球科学に限ったことではないといわれるが、地球規模の学問をしていくとき、とくに深刻な問題である。単に日本人が英語に弱いからだろうか。そうではない。英語に弱いフランス人が、へたな英語でも主張するのは会議でよく目にする光景である。日本にある沈黙の美学は、世界には通用しない。国際的には、「だまって聞いていること」は「分かっていること」を意味する。論文を出さないことは、研究をしていないか失敗したかである。忙しすぎて論文を書く時間がなかったのでしょうか、と世界の誰が好意的に解釈してくれるだろうか。

地球科学界で世界最大の学会である米国地球物理学連合 American Geophysical Union の日本人会員数が、ごく最近米国に次いで世界第2位になった。先日、「おめでとう」と、連合の事務局長に握手を求められたが、心の中は複雑であった。2年前英国バーミンガムで開催された国際測地学・地球物理学連合大会への日本人参加者数は、地元の英国を除くと、米国に次いで第2位であった。4年に1度開かれるこの総合大会は、アジアで初めて、2003年札幌市で開催されることが決定し、組織委員会で着々と準備が進んでいる⁽¹⁾。研究費や参加者数の割に、発表論文数が少ないということがないように関係者の努力が望まれる。発表論文が少ないことの原因は、いったいどこにあるのだろうか。このままで日本の地球科学は安泰なのだろうか。私は、これらの心配は、「予報か、基礎研究か」という命題に密接に結びついているように感じる。

予報を急ぎすぎ、観測に追いまくられて、研究する時間があるのだろうか。観測データが多いほど勝ちなら、研究費が多く出れば多くのデータが取れることになるが、そんなことで学問は本当に進歩するのだろうか。つまり、本当の意味の現象予報(つまり、全過程のメカニズムを解明した上での予報)に近づいたのだろうか、という率直な疑問が残る。

研究費があれば、当然観測機器をせっせと買う。データをせっせと取る。したがって、データ集がどんどん出るといふ循環が加速する。たしかに、地球科学がこのように「活発」なら、研究ポスト

が増え、機械メーカー、コンピューターメーカー、印刷屋さんが栄える。大学の事務局も、大きな数字の円を扱うことになり、一見活性化することだろう。観測所視察旅行にも行ける。

しかし、あまりにも強く地球科学者に予報を迫れば、「考えのない」経験則を観測で増やし続けることになりはしないか。さらに、観測のもとになる計測屋さんをむやみに儲けさせるだけになっていないか。計測屋さんにとっては、太陽や地球の自然現象の解明より、誤差のないデータを獲ることが第一の目的であるからだ。

このような、いわゆる「ハード主体」では、肝心の学問は決して進展しない。すなわち、人類が自然を理解し、自然現象に正しい解釈を与えたことにはならない。金を取ってきた教授自身が忙しすぎて、学問の基本が整う暇がない。これでは、将来を担うべき学生をルーチン観測に巻き込み、きちんとした基礎教育ができないばかりか、大学に学問をしない風潮ができればしないだろうか。世界中どこでも、いつの時代でも、大学の使命の一つは、将来を担う学生に基礎教育をし、学問の大切さ、面白さを伝えることであつたはずだ。理論なしの予報なら、衛星からの雲の写真や天気図をたくさん用意すればいいのだから。

ハード主体の影響は、学生に及ぶだけではすまない。このような一見忙しいグループからは、しっかりした解釈・議論に基づく学術論文がなかなか出ないので、外国からは、「金だけで学問はできない」と批判されることになりはしないか。また、忙しくて論文が書けないのならまだいい方で、実力がなくて書けない人にもどんどん研究費がいくようでは、どこかおかしい。実力がない人と、実力はあるが忙しくて論文を書けない人が同じ評価を得るのは、どう考えてもおかしい。研究は結果で、つまり論文で、評価されるべきであるが、今のままでは、理由はともかく、論文を書けない人が多すぎる。さらに深刻なことは、論文を書いていない教官が、いかにして論文の書き方を大学院生に指導できるのだろうか、この被害はまた学生に跳ね返っていく。このような、学問を知らない学生が将来教官になったら一体どうなるのか、想像するだけで恐ろしい。

本来、地球科学も、他の基礎科学と同じく、地球の構造や変動を知りたいという知的プレーの要素をもっているはずである。研究とは、未知の問題に取り組む、人間にだけできる営みである。研究とは、問題すらわからない深遠な行いのはずであった。ところが、最近では調査することを研究であると勘違いしているふしも見られる。本当の研究は、単なる工夫ともちがう。歴史的にみても、基礎研究の積み重ねがあり、それらの知的財産を応用することによってこそ、世の中がこれだけ便利になってきたのである。現象の予報を急ぎすぎではないだろうか。あるいは、データを集めるためにだけ金をつぎ込んではいないだろうか。

私の専門とする太陽地球系物理学においても、一般の人々にとってオーロラは単に神秘で美しい現象にすぎなかったが、オーロラと同時に宇宙の乱れが、地球上の電力系・通信や人工衛星に障害を与え、さらに生命にまで影響しているかも知れないことが最近わかってきた。つまり、予報の必要性が出てきたわけである。宇宙天気予報学という、新しい学問ジャンルができつつある。しかし、ここまでは確実にいえるが、ここは統計的にしかいえない、という評価を繰り返しながら宇宙天気予報の研究を進めることが肝要であろう。太陽から地球までの広い惑星間空間を伝わってくる、人間の目には見えない情報をわずか数個の人工衛星で監視しているわけであるし、宇宙天気の乱れの伝搬メカニズムを人類はまだ分かっていないのである。地球の内部が見えないことによる、地震学研究者のイライラと似ているような気がする。

公正な評価と資源配分

この数年で、日本の科学界はかつてなかったような新しいシステムに直面している。日本にも Center of Excellence (COE) という概念が導入された。新しい世紀に入り、科学技術基本法 (1995 年制定) も第 2 期基本計画に入った。そこには、日本が目指す科学の戦略として、知の創造と活用、ブレークスルー、フロントランナー、国際競争力、科学による豊かな生活など、いくつかの魅力的なキーワードが並んでいる。研究者の自

由な発想、好奇心に基づく独創的基礎研究の重要性が指摘されると同時に、地球環境、宇宙/海洋など地球規模の科学に対する日本の貢献を強調する重点項目がリストアップされている。

大学評価・学位授与機構による評価も、いよいよ正式に動き出している。しかし、せっかく研究に競争原理を持ち込み、COE (日本語では、「卓越した研究拠点」というらしい) を導入しても、日本式の「護送船団」式の予算配分方式や、すぐ効果が見える技術のみを先行させてはいけない。次のように、「世界トップ」と「国際性」が COE の定義なのである。

COE の条件:

- (1) 当該分野について、世界トップレベルの研究成果をあげており、それが世界で認知されていること。
- (2) 世界最高水準の研究を牽引するリーダーがいること。
- (3) 世界の最新情報がリアルタイムで伝えられ、わが国の当該分野における情報の集積拠点になっていること。
- (4) 国際的に開かれていること。

このような COE 機関を公募し、予算をつけるというのであるが、その分野で一番トップを走るグループを、敢えて応募させるという発想はそもそもおかしいのではないか。どうしても募集して決めたいというのであっても、世界レベルを謳うなら、審査は世界に出さなければならないと思う。とくに、基礎科学においては、見える結果を出すまで時間がかかるわけだから、世界レベルの競争をしているという基準で評価する必要がある。

これまでの日本の科学研究は、各省庁がそれぞれの考え方で、それぞれの予算システムの中でバラバラに行ってきた感がある。環境科学でも、地震学でも、省庁間で歩調を合わせる努力が足りなかったように思う。しかし、今回の行政改革で、科学技術創造立国という言葉が使われ、科学研究行政に抜本的見直しが計られようとしている。当然今度こそ、正しい評価に基づき研究費を配分するという期待をもってしまふ。ばらまき予算ではいけないし、単なる調査やデータ集めグループに集中する研究費でもいけない。内閣府にできた総

合科学技術会議が、省庁を超えて、学問に立脚した地球・宇宙科学の適切な将来計画をつくることに期待したい。

もちろん自然現象の予知・予報のための研究は大切である。しかし、「何を」「どこまで」予報するのか、「どこまでできて、どこまでできないか」をきちんとわきまえて、金をつぎ込んでほしい。そのためには、研究成果の正しい評価と先見性のある研究テーマの策定が必須である。緊急重要研究課題と称して環境問題を探り上げるのは、それ自体政策として悪いことではない。しかし、単なる環境測定や常に後手に廻るだけの環境保全対策に多額の「研究」資金を出しているだけで、「地球をより知ろう」という人類共通の基礎研究がおろそかになっては、孫の代になって必ず後悔することを悟るべきである。

重点的に資金を配分したことが後になって批判的になったのが、地震予知である。地震予知に関していえば、日本は1997年、大幅な軌道修正をせざるを得なかった。それまで35年間行なわれてきた地震予知計画全体がレビューされ、研究の到達度合の評価が可能のように、具体的な目標を設定することとしたのである。そんなことは当たり前ではないかといわれれば、その通りであろう。私は、そもそもはるか1965年にスタートした地震予知計画が、「数年間のデータ蓄積で、地震発生との関係を明らかにできる公算は大きい」という、勇み足的な目標設定をしたことが「読みが甘かった」ような気がする。自然は、そんな甘いものではないはずだ。もっとも、当時の計画に関わった研究者に聞くとよれば、予知計画の基調は、予知を焦るよりむしろ基礎データを集めること（つまり、狭い経験則に陥らないようにすること）だったというし、「計画のすべてが今日スタートすれば」という条件がついていたということではある。

しかし、将来の地震予知につながると思われる情報が着実に得られてきたことも事実である。すなわち、地球に関する基礎知識が増大したということである。日本付近のプレート沈み込みや空白域（今まで起きていないから、近いうちに起きるはずという地域）に関する、かなり詳しい情報が

得られたことである。しかし、こうした沈み込みは、ダイナミックな地球内部現象の一環であり、応用的には地震の繰り返し度（つまり、確率）の研究といってもいいし、基礎的には、プレート運動を起こすマントル対流の研究といってもいい。その結果、エネルギー蓄積が、何と1000年のサイクルで起きる地域もあることが分かってきたのである。人間のライフサイクルからして、それは長すぎると行政が感想を述べるかも知れないが、それが自然界なのだから仕方がない。

先日アメリカで開催された宇宙天気に関する国際会議で、太陽風の存在を理論的に予言していたシカゴ大学のE. Parker教授が、「これから少なくとも1000年間かけて連続の観測データを積み上げ、太陽黒点活動と地球の気候の解明に当たらなければならない」というメッセージで講義を締め括ったことは、大変印象的であった。ふだん、予知できた、できないで右往左往している記事に浸りすぎていたせいか、フレッシュにさえ感じた。私たちが小学生のころ習った太陽定数が、実は定数ではなく刻々と変化していることも、最近の人工衛星のデータで分かってきたのである。しかも、その「定数」が太陽の黒点数と高い相関関係にあることも本当らしい⁽¹²⁾。黒点は、ガリレイが望遠鏡で太陽を覗いて以来ずっと数えられてきたものであるが、なぜ黒点が多ければ太陽全体からの放出熱が多いのか、地球の温度とどういう関係になっているのか、その種の研究はいま始まったばかりである。図2は、いろいろなモデル/観測をまとめた過去1000年間の地球の平均気温の変動である⁽¹³⁾。西暦1600~1700年の寒冷期には確かに太陽黒点が姿を消しているし、産業革命以来地球の気温は徐々に上昇していることも明らかである。しかし、私が小学生の頃に騒がれた、地球寒冷化もこのグラフに再現されている。要するに、私たちは自然をどれくらい理解したのだろうか、と疑問をもってしまうのは私だけではあるまい。

評価には二つの重大な視点がある。「学問的意義」と「社会への貢献」である。長期的には、これらは一致するべきものであろう。どれくらいのタイムスケールが長期なのかは、現象の規模による。前者には、もちろん研究者の能力の評価に始

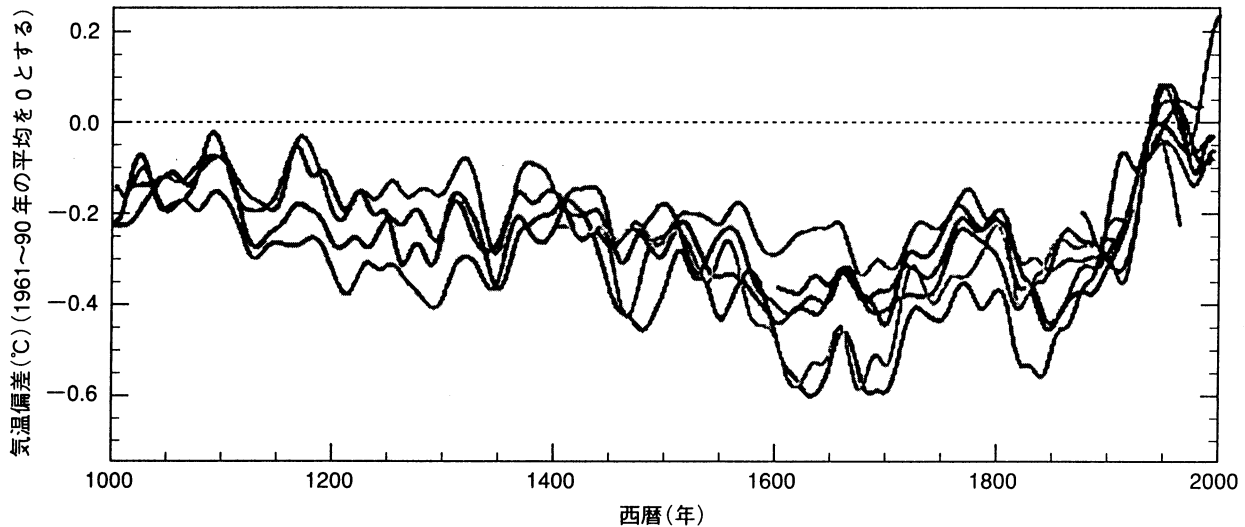


図2——過去1000年の気温変動(北半球緯度20度、陸地での平均)⁽¹³⁾。異なる手法、統計処理による7本の曲線を示した。詳細は異なるが、全体の傾向は共通している。この1000年間のデータにはいろいろな周期の変動が見られ、とくに産業革命以来の温暖化傾向は明瞭である。

まり、研究テーマの水準、提案されるテーマの独創性、今後の発展性、他の分野への貢献度が含まれる。後者では、地球科学の場合、新しい予報アルゴリズムの創出、地球規模の問題解決への貢献度が評価の対象項目となるはずである。

研究とは、想像と創造をつなぐ人間だけにできる知的プレーであるから、解くべき問題すらわからないところから始まる。だから、少し進んだところで軌道修正をしなければならないことがしばしばある。理由さえはっきりしていれば(予想が狂った、も立派な理由である)、途中での目的変更、大いに歓迎である。評価も、これにきちんと向き合わねばならない。大学の独立法人化でにわかに出てきた5年程度の中期計画とその評価について、頭からこれに反対する研究者がいるが、国民の税金を使っている研究に説明責任があるのは当然であろう。

評価はもちろん、研究の活性化を計るという積極的な目的が主であるが、発展性のない研究グループ、つまり活用されることもないようなデータを取っているだけというようなグループと判定されたら、思いきってカットしなければならないだろう。データを取ることで、その活動は業務あるいは単なる調査であり、基礎研究とは区別して、社会的必要に応じてのサポートを考えればよいだろう。

評価は、その分野の学問的識見はもとより、国際感覚、予測能力、広い学術視野をもった人が厳

正な判定をすることに尽きる。評価の問題は、評価する側も感情をもった人間であり、100%正しい評価は期待できないということであろうか。しかし、その弱点を強調し、「どうせ100%正しくできないなら、平等に」を繰り返しては、また日本式的美徳に終わってしまうだろう。個々の研究課題の審査に当たる研究者(ピアレビュー)の上に、高度な研究経験を有し、かつマネジメントにたけた人材に、科学研究費の採否について長期的に運営に当たってもらうことを提案したい。

私は、地球規模の学問の評価は、日本の中に適切な人が見出せない場合は、思いきって外国人に評価の権限を委ねるのも一案だと思っている。そして最初に掲げた「予報か、基礎研究か」という命題に戻ると、これは or の問題ではなく、答えは当然両者のバランスが大事であるということになる。バランスの相対的重要性は現象の規模、時間スケールによって異なるだろう。評価、つまり資源配分、に当たっては、その現象の因果関係はどこまで判っているのかを見極め、研究者の先見能力をテストすべきである。もちろん、グレー領域もあり得る。動機は合格であるが、成果まで到達できるかどうかかわからない研究には、2,3年程度のFS(Feasibility Study)、すなわち「お試し研究」という制度を導入することも必要ではないだろうか。

どちらが大事か

本稿「予報か、基礎研究か、どちらが大事か」を地球科学についてまとめると、私の意見は次のようになる。

(1) 惑星地球号は、太陽との微妙なバランスの上に成り立っている。そして、地球の周りだけではなく、地球自身の内部さえもダイナミックに生きている。人類の知らないことは、まだまだ多すぎる。ここに、自分たちの棲んでいるこの星、そして宇宙での地球の立場を理解しようとする基礎研究の大切さがある。この基礎研究からの結果としての、現象の予知・予報を急ぎすぎてはいけない。人類の共通の財産を増やす研究と捉えるべきであろう。

(2) 自然界には、突発現象もあれば、何百年もかけてゆっくり進行する現象もある。自然が突然暴れると、人間生活に被害が及ぶ。経済問題に達することもしばしばある。その意味で、地球現象の予報は社会からの強い要請であり、また予報を急ぐには基礎の発展も必須なので、基礎研究にとっても悪いことではない。

(3) 予知・予報の研究に対しては、過去の研究実績としっかりした研究動機に基づいて評価をし、プロジェクトの採択を決めること。「何をどこまで」という提案なしに、あるいは適切なインフラなしに予算がつくと、観測やデータ解析の忙しさの犠牲は、将来を担うべき学生に行ってしまうからである。

(4) 基礎研究と予知・予報の健全な協力が必要である。理論と観測の付き合い合わせが、地球科学の発展を進める。そして両者とも、厳しい中間評価が必要である。この中間評価では、最初の目的/方法の変更は大いに認められる。基礎研究でも予報でも、予想外の発見があり得るからである。

「予報か、基礎研究か」という命題は、完全に一緒ではないが、「科学か、技術か」という問題に酷似している。日本には科学技術という得体の知れない言葉があるが、これは、Science and Technology と and を入れて解釈すべき言葉で

ないだろうか。ひょっとして、日本の政治家たちは、科学技術という言葉で、科学知識を使った技術、つまり Science-derived Technology と決めつけていないだろうか。

科学は、歴史が教えるまでもなく、人類が自然を理解し、共有しようとする、あるいは自然を支配している法則 law を理解する試みであり、技術は何かを工夫/発明/開発することが目的である。私たちが棲みついている地球を知る努力が科学であり、そこから得られた知識を使って何かを予報することは、科学から得られたことを社会に還元する正当な手段ではある。しかし、このプロセスを焦ってはいけないし、間違っていない。これは、地震でも大気環境でも、宇宙天気でも同じことである。

謝辞 本稿執筆中、有益なコメントをいただいた上田誠也、小嶋稔、R. ゲラー教授に感謝いたします(ただし、本稿の結論はあくまで著者に責任があります)。

文献

- (1) R. J. Geller: *Geophys. J. Int.*, **131**, 425(1997); M. Wyss et al.: *Science*, **278**, 487(1997); 月刊地球総特集「新地震予知研究」(1998)など
- (2) P. Bak et al.: *Phys. Rev. A* **38**, 364(1988)
- (3) B. Gutenberg and C. F. Richter: *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, Hafner Pub.(1949)310 pp.
- (4) S. C. Chapman: *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2398(1998)
- (5) A. T. Y. Lui et al.: *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 911(2000)
- (6) B. R. Dennis: *Solar Phys.*, **100**, 465(1985)
- (7) たとえば、茂木清夫: 地震予知を考える, 岩波書店(1998); 長尾年恭: 地震予知研究の新展開, 近未来社(2001)
- (8) 上田誠也: 地震予知はできる, 岩波書店(2001)
- (9) 川崎一朗ほか: サイレント・アースクエーク, 東京大学出版会(1994)
- (10) J. -G. Wu and H. Lundstedt: *J. Geophys. Res.*, **102**, 14255(1997)
- (11) ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-e/iugg/index.html> を参照
- (12) J. Lean: *Rev. Geophys.*, **29**, 505(1991); C. Froelich and J. Lean: *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 4377(1998); J. Lean, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2425(2000)
- (13) K. R. Briffa et al.: *J. Geophys. Res.*, **106**, 2929(2001)