

危険な小惑星を見張る

磯部琇三

総合研究大学院大学助教授光科学専攻／国立天文台助教授

小惑星の地球衝突による人類滅亡はありうるか？

地球に接近する“危険な”小惑星の検出作業が、大容量のCCDカメラなどの応用によって、一気に効率アップしている。

しかし、未発見の地球接近小惑星の数は推定100万。天文学者たちは、小惑星の世界的な監視システムを早急に整備するよう訴えている。

人類の終末

神話の世界の多くでは、大地もその上で生を営む生物も、さらに人間自身も神々によってつくられた、ということになっている。そして、神々の怒りに触れると、多様な形で自然の力によって人類は滅ぼされる。それは洪水であったり、火山の噴火や巨大地震であったりする。なかには、天から岩が降ってくる、というものもある。地震、火山噴火、洪水はたしかに大災害をもたらす、現在でも人々にとって大きな脅威である。

しかし、よくよく考えてみれば、それは人類の終末をもたらすレベルのものでは決してない。たとえマグニチュード8という巨大地震が起こったとしても、その影響は数十キロメートルの範囲であり、運悪く大都市が直撃されたとしても、数万人規模の死者がでるだけである。“だけ”と書くと、いかにも不謹慎なことを言っているように聞こえるが、その

真意は、ここで話題にしようとしている“人類の終末”というレベルに対比すれば、死者数は“たった”0.01パーセントに過ぎないということである。火山の噴火、大洪水等の災害であれば、被害は地震よりさらに小さなレベルでおさまるだろう。

しかし、小惑星の地球衝突は、文字どおり“人類の終末”をもたらすのである。もちろん私たちは、そのことを前面にかざして人々を脅そうとしているわけではない。小惑星の衝突問題は、いまや純粋に科学的研究の対象である。にもかかわらず、得体の知れない宗教家からいっしょに活動をしようなどと誘われることもあり、残念ながら、まだまだ認識不足の一面があるようだ。

事実、これまでの地球史の中で、人類を終末に導く可能性のあった巨大小惑星の衝突は確率的（1億年に1回の確率）に起こっている。その顕著な例が、6500万年前に起こった直径10キロメートルの

小惑星衝突であろう。メキシコのユカタン半島にその跡と考えられる巨大陥没構造がある。この衝突によって恐竜が絶滅したといわれている。

太陽系を飛び交う小惑星の地球の公転運動に対する相対速度は、平均的には毎秒20キロメートル程度である。これをもとに、いろいろなサイズの小惑星が地球に衝突したときに解放される運動エネルギーを計算した（表1）。直径10メートル以下のものは、大気圏で燃えつきてしまい、地上に落下してくることはほとんどない。直径数十～数百メートルの小惑星では、10～1000キロメートル平方の地域が壊滅する。6500万年前の衝突では、実に広島型原子爆弾1兆個分のエネルギーがいっきよに解放された。神の力を借りなくても“人類の終末”がありうるということが理解できるであろう。

小惑星の地球衝突を示す痕跡

では、ほんとうに心配しなければならないほど、小惑星衝突の可能性は大きいのだろうか。それを簡単に確かめるには、月の表面を見ればいい。普通の双眼鏡で見ても、月面に数多くのクレータがあるのがわかるだろう。少し口径の大きい（口径8センチメートル程度以上）望遠鏡を使えば、大小のクレータが無数と言ってもいいほど見える。これらのクレータは、小惑星の衝突によってできたものである。大きなクレータの中に小さなクレータが折り重なっており、長い年月の間に次々と衝突してきたことがわかる。太陽系の中で、地球と月はほんの隣り同士である。小惑星が月に衝突して、地球に衝突

	小惑星 (m)	彗星 (m)	エネルギー (TNT火薬でメガトン)
	10	6	0.024
I 国規模の破壊：	60	36	20
	80	48	50
	150	90	340
II 全地球規模の破壊：	500	300	13,000
	1,000	600	100,000
	10,000	6,000	100,000,000
広島型原爆			0.02
核の冬			10,000

表1 いろいろなサイズの小惑星・彗星衝突によって解放されるエネルギー量
地球との相対速度は小惑星で20km/s、彗星で60km/sという平均的な値を仮定している。

図2 発見されている地球上のクレータの分布。安定した地表面のところで多く残っている。メキシコのユカタン半島に直径180kmものクレータが見つかったのは1991年のことである。

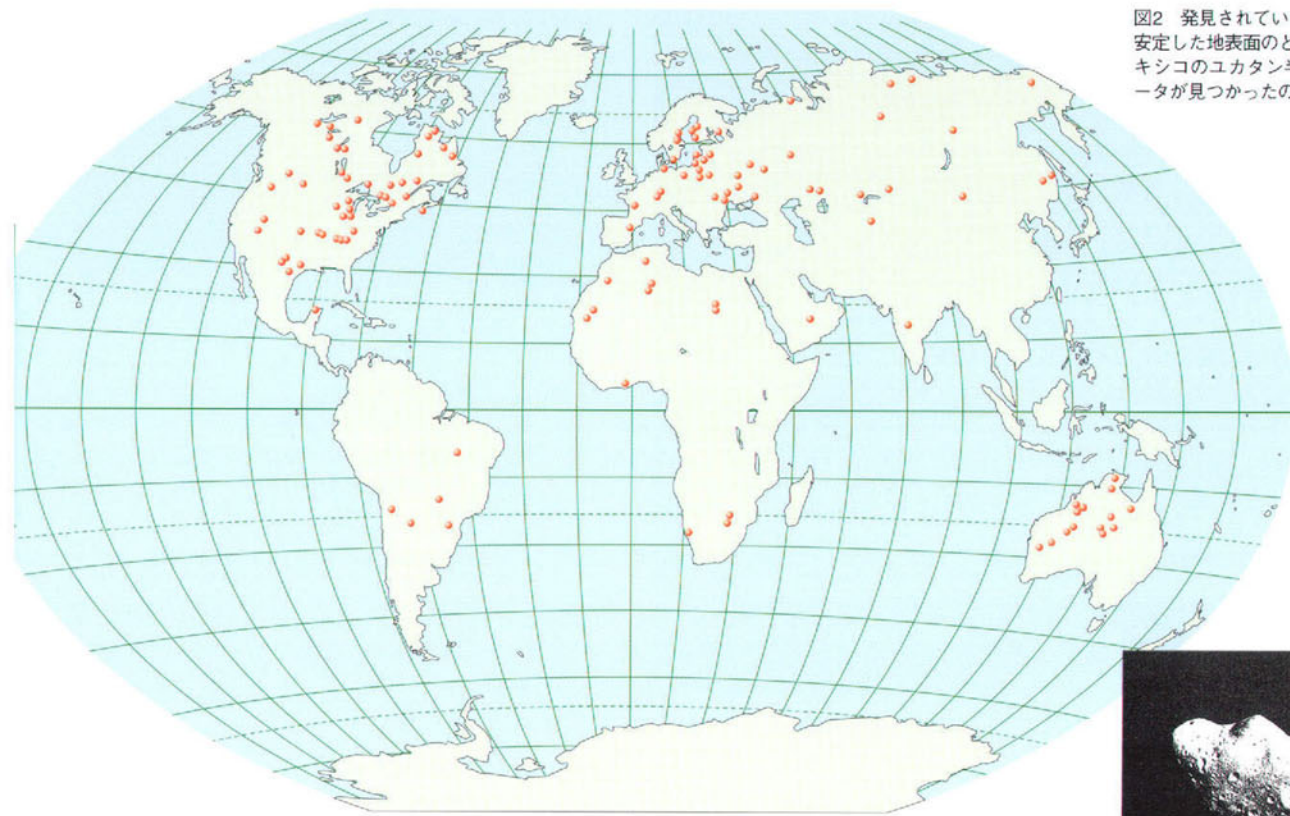
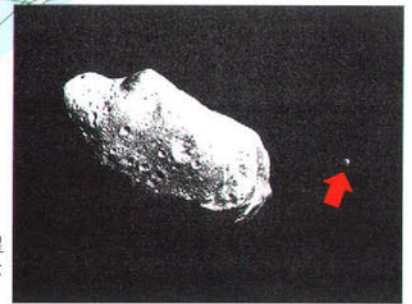


図1 ガリレオ探査機が接近して撮像した小惑星ガスプラの表面模様。連星系をつくっていて、より小さい小惑星ディクトル(矢印)も捉えられた。



しないはずはない。

近年、アメリカ航空宇宙局 (NASA) の探査機が小惑星をフライバイ (接近飛行) して、いくつもの近接写真を撮っている (図1)。その表面には、想像されたとおり、やはり無数のクレータが写っていた。

では、地球はどうだろうか。地球表面には、火山の噴火によってできたクレータはたくさんあるが、小惑星衝突によってできたものは、それほど多くは発見されていない。地球の場合、水による浸食作用や風化作用で、長い年月の間に衝突の痕跡が消されてしまうからである。現在までに見つかっている、明らかに隕石孔 (大気中で燃えつきずに地上に落下した物体を「隕石」という) と思われるクレータは、150個ほどである。しかし、その数は探査がすすむにつれて徐々に増えている (図2)。

2001年には、イタリアのローマから約70キロメートルのところ、直径140メートルほどの小さなクレータが見つか

った。クレータのサイズは、衝突物体の20倍程度になるのが通常である。つまり、直径7メートルほどの隕石が衝突したことになる。このような小さなクレータは現在までのところ、ほかには見つからない。直径30メートル程度までの岩石質の隕石では、大気圏突入時に摩擦熱でバラバラにされてしまうからである。このクレータは、例外的な「隕鉄」(天体の内部が沈殿した金属からなる隕石) によって西暦412年につくられたのである。

アメリカのミサイル防衛網が観測したところでは、大気中での広島型原子爆弾クラスの爆発 (直径10メートルの小惑星に相当) が、3カ月に2回の頻度で起こっている。

見つけなければ始まらない

小惑星が地球に衝突する軌道に乗っていることがわかったとき、2つの対策が考えられる。1つは、小惑星を粉々に砕くこと。もう1つは、何らかの方法で運

動エネルギーを与え、その軌道を変えることである。核爆弾を使うとか、小惑星に帆を張って太陽風の作用を受けさせるとか、小惑星表面から物質を放り出すなど、さまざまな案が検討され、研究も始まっている。しかし、このような面でもんなに進展があっても、まず、地球に接近したり衝突したりする可能性のある小惑星を見つけないければ、何も始まらないことは明らかである。

小惑星が最初に発見されたのは、1801年1月1日のことであった。火星と木星の軌道の間で見つけられたその小惑星は、セレスと名づけられた。その後、発見が相次ぎ、現在では10万個を超える小惑星の存在が確認されている。小惑星は、火星と木星の軌道の中に集中しており、分布の様子が帯のように連なって見えるところから、小惑星帯と呼ばれている (図3)。

小惑星のサイズはさまざまである。当

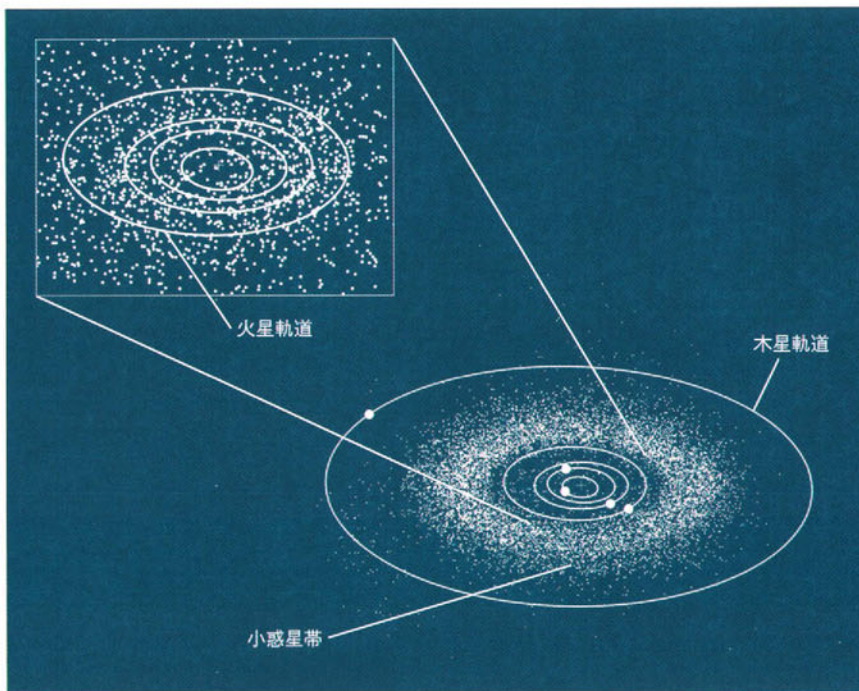


図3 確定番号がついた小惑星1万個の2003年8月1日現在の位置。
左上は、発見されている地球近傍小惑星（確定番号がついていないものも含む）
の8月1日現在の市

然ながら、小さいもののほうが圧倒的に多い。人類の終末をもたらさう直径1キロメートル以上の小惑星の数は、1000~1400個と見積もられている。現在まで600個が見つかっており、あと半分ほどが未発見である。これに対し、直径数十メートルから数百メートルの小惑星で未発見のものは、100万個を超えると推定されている。10メートル以下のものについては、先に述べたように大気中で燃えつきてしまうので、考慮する必要はない。

地球の軌道に近づいてくる小惑星が最初に見つかったのは1895年のことで、エロスと命名された。その後、アモール、イカルス、アポロ、アテンと続き、地球

に接近することがわかっている小惑星は、現在、2000個以上ある。

地球接近といっても、地球と太陽との距離（1億5000万キロメートル）に対して近いというだけで、予測される最接近距離は、1000万キロメートル以上のものが大部分である。しかし、ときには、地球を回る月の軌道より内側を通過することもありうる。また、ある時点で突然、数十年後に地球に大接近することが明らかになったりすることもある（表2）。

太陽系の天体の運動は、基本的にはニュートン力学に従っている。ニュートン力学は決定論的であるので、現在の軌道を正確に決められれば、地球と衝突する

かどうかを決めることができるはずである。しかし、実際には観測に誤差があるため、将来のある時刻における位置は確率論的にしか扱えないことになる。確率論的な予測は天気予報にも取り入れられてはいるが、まだ、十分に理解されていない。たとえば、発見の時点では、小惑星「1997XF11」が2028年に、また「1999AN10」が2034年に地球に衝突する可能性が存在した。そういうとき、あくまでも確率論的な可能性であることをきちんと説明せずに、「衝突の可能性」などとセンセーショナルに扱うマスコミがあると、いかにも天文学者がこのような騒ぎをあおっているような印象を持たれてしまう。実際には、数カ月の継続観測により衝突確率を消すことができたのである。

大視野望遠鏡の建設

小惑星が地球に接近するケースは、図4のように2つの楕円が交わる2点（A、B）で起こる。Aは小惑星が地球の夜側から接近する場合で、Bは昼側から来る場合である。小惑星が昼側から接近してくる場合は、宇宙探査機か宇宙望遠鏡でなければ検出することができない。したがって、夜側にあるときにしっかり観測し、軌道をできるかぎり正しく求めておくことが必要である。

いずれにしても、もし、すべての地球に接近する小惑星の軌道を決定することができれば、この100年間に地球に衝突するものがあるかないかを明確に決めることができる。

地球に近づいてくる小惑星をすべて見つけるには、視野の広い望遠鏡が必要である。一定期間（10年くらい）に効率よく全部を検出するには、できれば視野直径が1.5度四方以上のものが欲しい。アメリカでは、マサチューセッツ工科大学（MIT）、アリゾナ大学など5つの観測チームが、広視野での観測を進めている。私たち日本のチーム（特定非営利活動法人「日本スペースガード協会」）も、より広い視野のシステム（図5）の開発を続けてきた。2002年に作成した2キロピクセル×4キ

表2 21世紀中に衝突の確率がある小惑星の例

衝突が予測されている年	小惑星名	最接近距離 [km]	
2003, 2010, 2046	1991BA	0.01	30万分の1以上の確率 [2003]
2014, 2038, 2044, 2046	1998 OX4	0.2	200万分の1の確率 [2044, 2046]
2022	2000 BF19	0.5	発見: 2000 Jan., 軌道決定: 2000 Feb.
2036, 2039, 2044, 2050	1994 GU	0.01	7000分の1の確率 [2039]
2040, etc.	1997 XF11	2	発見: 1997 Dec., 観測: 1990, 軌道決定: 1998 Mar.
2041	2000 EH26	0.2	発見: 2000 Mar., 軌道決定: 2000 Apr.,
2042	1995 CS	0.04	20万分の1の確率 [2042]
2042, 2050	1999 RM45	0.5	発見: 1999 Sept., 軌道決定: 1999 Oct.
2044, etc.	1999 AN10	1	発見: 1999 Jan., 観測: 1955, 軌道決定: 1999 July
2030	2000 SG344	0.03	

ロピクセルのCCDチップ10枚をモザイク状に並べた広視野カメラが、ようやく稼動するようになったところである。

このモザイクCCDカメラを使って、小惑星を見逃さないように、次から次へと空の部分部分を調べていくのだが、全天はあまりに広い。順に観測をしていっても、観測し終わったところに小惑星が逃げ込んでしまうので、全天を1回、見回しただけで完了というわけにはいかないのがやっかいである。しかし、根気よく観測を続けていけば、直径1キロメートル以上のものの軌道をすべて決めてしまうのに、そう長い時間かからないであろう。

問題として残るのは、直径1キロメートル以下の小惑星である。小さければ小さいほど、その検出には口径の大きな望遠鏡が必要になるからだ。たとえば、100メートルクラスの小惑星を木星までの距離で見つけるには口径10メートルクラスの望遠鏡が不可欠となり、それだけでも現実的ではない。より小さな60メートルクラスになると、口径が30メートルという超巨大な望遠鏡が必要になる。直径100メートル以下の小惑星の軌道を地上観測だけで知ることは、現在では、ほとんど不可能である。人類滅亡ではないが、相当な被害をもたらすであろう小型の小惑星についても、何らかの対策が必要であろう。

超多量データ

2キロピクセル×4キロピクセルのCCDチップを10枚並べると、1回の露出で80メガピクセルのデータが得られる。各ピクセルの奥行きとして16ビット(2バイト)にしてあるので、160メガバイトになる。現在、CCDチップ上の電荷の読み出し速度をより速くする工夫がすすんでいて、アメリカのMITではフレーム転送法によって10ミリ秒という短時間に読み出しできるシステムを開発した。しかし、まだ1.5キロピクセル×1.5キロピクセルが利用できる最大のサイズである。私たちの美星スペースガードセンターのモザイクCCDカメラでは、通

常の速度でしか読み出せないので、読み出しのためにだけでも45秒もかかってしまう。

天体画像を得るためには、当然、露出をしなければならない。露出時間が長ければ、それだけ読み出し時間の重要性は小さくなる。MITのチームは、われわれと同じ1メートル望遠鏡で10秒露出をしているので、19等級程度の暗さまでの星(小惑星)しか検出できない。美星スペースガードセンターでは、いま60秒露出によって20.5等級に達する努力をしている。長い露出時間でより小さい小惑星を発見することによって、読み出し時間の不利を克服し、MITと同じレベルの小惑星検出が可能になるのである。

空の同じ位置を異なった時間に撮像した数枚(3~5枚)の画像を連続して表示すると、小惑星のように移動する天体を簡単に検出できる(図6)。しかし雑音レベルをわずかに超える信号を示す暗い(20.5等級に近い)移動天体は、画面全体で1万個を超え、1つ1つ目で見つけるのはたいへんな作業である。そこで私たちは、コンピュータによる自動検出のソフトウェアをよりよいものにする開発をすすめている。

一方、データ量もたいへんなものになる。概略の計算を行うと、2分間に1枚の画像が得られ、1晩に10時間観測でき

るとすると、約30ギガバイトのデータが得られる。美星スペースガードセンターには、4テラバイトのデータ保存システムがあるが、半年余りで満杯になってしまう。

多量のデータには、目的の小惑星は当然含まれているが、それ以外にも一般の人が楽しめる星雲等の天体から天文学者が利用したい変光星のデータ等も、同時に写り込んでいる。それらを有効活用することも、天文学の世界に対する大きな貢献の1つになると考えている。

小惑星観測データの教育への利用

観測データを最初に使う権利は当然のことながら美星スペースガードセンターが持っている。しかし、小惑星、とくに地球に接近する小惑星の検出作業は、自動検出ソフトの開発により、観測終了後、数時間以内に完了してしまう。新小惑星が検出されれば、ただちに国際的なネットワークに流して、次に、夜になっている地域にある天文台で追跡観測をしてもらい、第一近似的な軌道決定を行う。当然、他の天文台が見つけた新小惑星の追跡観測を美星スペースガードセンターが手伝う場合もある。

このような作業がすすめば、観測の翌日には、これらのデータは地球に衝突する可能性のある小惑星の発見、という美星

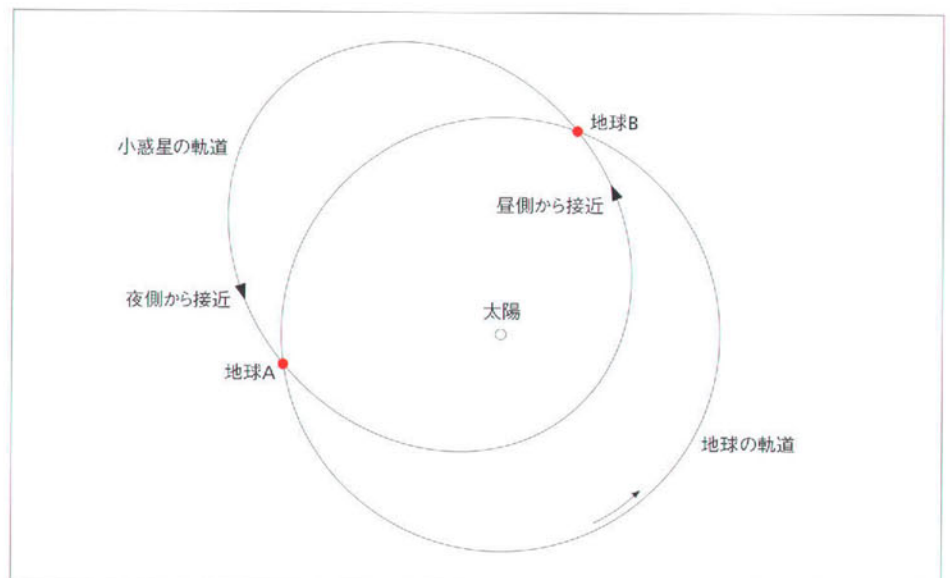


図4 小惑星が地球に接近したときの軌道

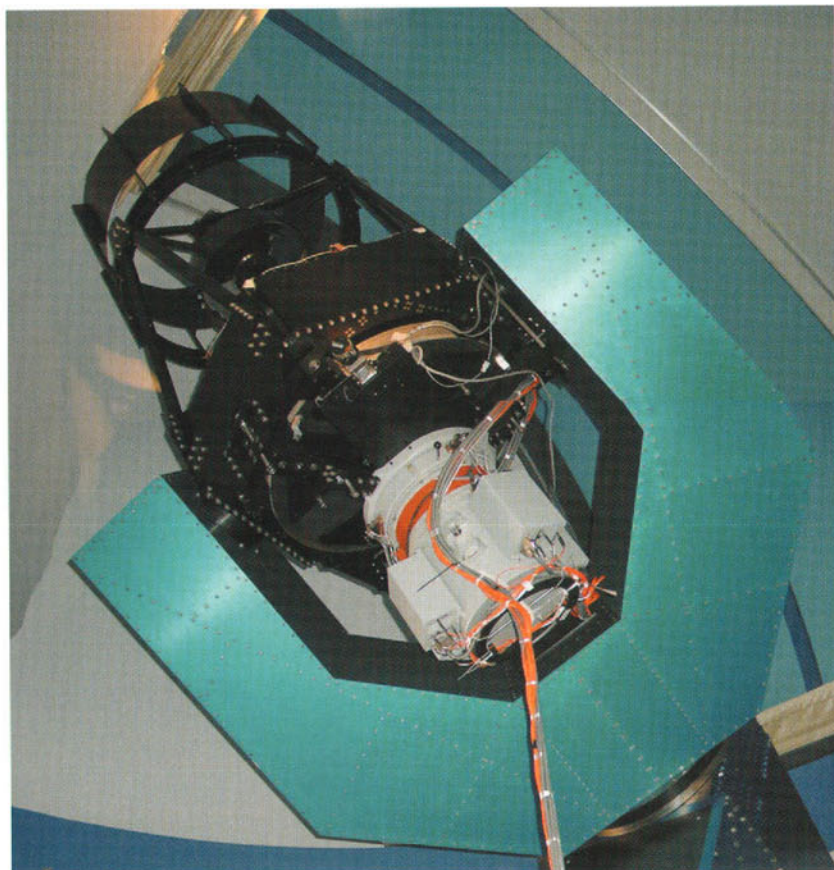


図5 岡山県美星スペースガードセンターの口径1m広視野望遠鏡

スペースガードセンターの目的には必要ないものになる。もっとも、過去のデータを検証するために、データは保存しておく必要がある。

日本スペースガード協会では、観測後、2週間以内のデータの中には、協会で見逃した小惑星の発見につながりうることから、教育用に優先的に割り当てる予定である。そして、その目的のためにソフトウェアを完成させ、CD-Romで配布したり、ウェブページから直接ダウンロードできるようにもした（URLは2003年中に公開。早くほしい人は、申し込んでいただければ、CD-Rom versionをお送りします。無料）。その内容は、私たちがこれまで肉眼で行ってきた小惑星検出をそのまま実行してもらうものである。コンピュータさえ使えば、天体観測が初めての人でも指示通り順に作業をすれば、小惑星が拾い出せるようになっている。

天文学者の要求に応えることを主目的として、これまでは過去のデータをCD-

Romで配布していたが、総研大での研究開発によって、やはり新しいデータをインターネットを通して配布できるようになった。日々の観測ログを表示し、必要な天体を含む座標を指定すると、その領域をカバーする画像リストが得られるものである。

教育用には、空の各領域の数枚（3～5枚）の画像をそれぞれの学校や一般の人に個別に送らねばならない。最近のハッカー横行の状況を見ると、だれにでも自由に入ってもらうわけにはいかないようなので（多量のデータをいっきよに壊されてしまう危険性がある）、利用許可をどのように与えるかなど、検討しなければならない問題点はいくつも残っている。目下のところ、特定のグループに仮運用の形で使ってもらって、その評価を待っているところである。

学問の世界を一般の人々に実体験してもらう機会を増やすうえでも、意義ある試みであろうと自負している。

「空からの災害」に対する危機管理

2002年には、地球に接近する小惑星が、いくつか見つかって、マスコミに取り上げられた。曰く、「天文学者は危険な小惑星を見逃した」。しかし、この解釈は小惑星の運動に対して理解が足りないところからきたものである。

すでに述べたように、直径1キロメートル以上の小惑星は、時間さえかければ、すべての軌道を決定できるが、より小さい小惑星の場合は、たまたま地球に接近したときにしか見つけることができない。しかも数が多いので、それだけ接近・衝突の可能性も大きくなる。

また、軌道の不明な小惑星が、昼側から近づいてくるのは、いわば予告なしに衝突してくるわけで、これは防ぎようがない。宇宙望遠鏡によって監視するしかないだろう。

幸い、直径100メートル以下の小惑星が地球に衝突しても、人類の終末とはならない。一地域（それでも100キロメートル四方に及ぶ地域が壊滅する）だけの被害ですむ。直前にならないとわからないこのような衝突は、受容するしかないだろう。しかしその場合は、1時間でも1日でも早く衝突の予告を出せるシステムを構築し、人々が落下地点から避難できる時間を与えるようにしなければならない。これは、いつどこで起こるかかわからない地震発生のケースと、その被害規模ははるかに大きいですが、よく似た構造になっている。

不可欠な国際協力

危険な小惑星の検出は、1ヵ所の天文台で行えるものではない。地球に比較的近いところまで来ている場合、その天球上の動きは速い。初検出からなるべく早い段階で次の観測がないと見失ってしまうことになる。そのため、経度が異なるところにある天文台の協力は不可欠である。

一方、前節で示したような危機管理の問題も国際的に考えざるをえないものである。地球衝突が避けられないとわかったとき、A国が、自国に落ちるのを隣のB国に落ちるようにする何らかの技術開

発をこっそりやっていたらどうなるか。それを考えれば明らかであろう。

このような危険性を考慮して、経済協力開発機構（OECD）が2002年1月からこの問題の検討を始めた。日本からは筆者が文部科学省の推薦で出席し、観測面での日本の貢献を約束するだけでなく、地震など災害経験の豊富な国の立場から、世界的警告システムを構築すべきであることを主張した。目下、各国政府の反応待ちの段階である。

地球衝突小惑星問題は、アメリカのNASAが中心になり、空軍の協力を得て研究を進めてきた。実質的には、アメリカだけが活動してきたと言っていだろう。いまは、観測面では、美星スペースガードセンターによって日本が加わり、軌道計算では、イタリアのチームも活躍し始めた。当初から支援していた国際天文学連合も、最近では積極的に参加している。

ようやく、地球衝突小惑星問題は、アメリカ一國主義から脱しつつあり、国際連合の宇宙平和利用委員会でも取り上げられるようになった。その性質上、国際協力が不可欠な分野であり、日本の持つノウハウが大いに役立つ状況になっている。派手な国際イベントにお金を使うだけでなく、このような、地味ではあるが全地球的な活動を中心となって支援することによって、世界に貢献することが必要であろう。

人類の行く末

この文章は、人類の終末を考えるとこ

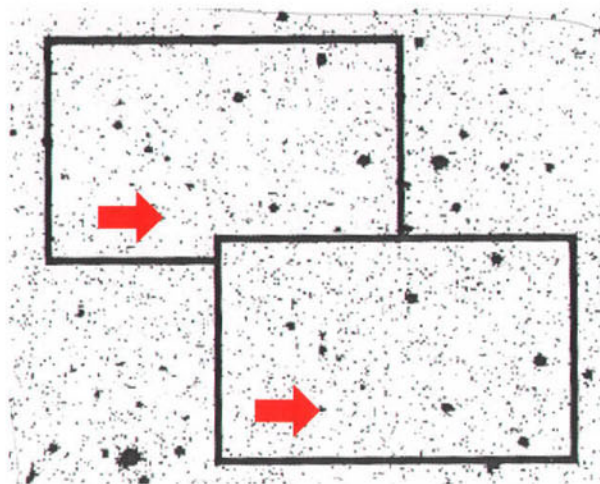


図6 美星スペースガードセンターで撮影された画像。専用の解析ソフトウェアに入れることによって、移動する星（小惑星。矢印で示している）が簡単に発見できる。

ろから始まった。これまでの地球上の生命種の盛衰を見ると、いつか人類にも滅びの日が来るのは確かであろう。かつて、最強の生命種であった恐竜は1発の小惑星衝突によって終末を迎えたが、人類も同じ道をたどるのであるだろうか。

人類は道具を発明し、恐竜が予知できなかった現象を予測し、しかも防ぐ方法も曲がりなりにも持ち始めている。努力しさえすれば、彼らが遭遇したような終末は避けられるのであろうか。

小惑星衝突による人類の終末は、100万年以上先のこともかもしれない。しかし、観測が十分なされていない現在、予言は確率論的なものでしかない。小さな隕石が1週間後、1ヵ月後に衝突する確率はゼロではない。

人々は、むしろ、そのような危険は知らないまま、突然滅んでいくほうがいいと思うのだろうか。あるいは、その危険性をよく理解して、科学的に対処する努力をすべきだと考えるのだろうか。しかし、それは人生観、宗教観のレベルの問題であり、私の個人的見解をさしはさむ余地はない。

私たちは、人類の存続を守るために、日々、監視活動を続ける道をえらんだのである。

本稿は総研大共同研究「研究・教育両面における超多量データの高度解析と国際的共用化に向けた研究」および電源開発地域振興費によるものである。また、本稿の一部は総研大共同研究「科学と社会」での議論によっている。

磯部 瑠三 (いそべ・りゅうぞう)

太陽系の形成過程、惑星間塵の研究に長年携わり、その中で人類の未来を見据えて未開拓であった地球接近小惑星と衝突現象の研究に力を注ぐようになった。1996年、天体衝突問題に取り組む組織として日本スペースガード協会を設立し、国際スペースガード財団と協力して全地球的な観測体制をめざす活動を続けてきた。2001年から、岡山県美星町の施設で本格的な観測をスタートさせている。



【参考文献】

- ・S.Isobe et al.2002, Educational Program of Japan Spaceguard Association using Asteroid Search.Spaceguard Detective Agency, in Proceedings of Asteroid, Comets and Meteor (Technical University Berlin), pp.817-819
- ・S.Isobe 2000, Near-Earth Asteroid Observation and its Educational Application Seminars of United Nations Programme on Space Application 9th United Nations/European Space Agency Workshop, pp.23-29
- ・S.Isobe et al.2001, New Bisei Spaceguard Center for Detection of Near-Earth Asteroid and Space Debris, in AMOS Technical Conference 2001, pp.420-425