

特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」

スペースガード観測の現状

浦川 聖太郎¹, 高橋 典嗣¹, 浅見 敦夫¹, 西山 広太¹,
奥村 真一郎¹, 坂本 強¹, 橋本 就安¹, 三輪田 真^{1,2}, 布施 哲治^{1,3},
吉川 真^{1,2}

(要旨) スペースガードとは、地球へ接近する太陽系小天体(Near Earth Object=NEO)の発見、衝突回避の研究を行う活動である。1990年頃より、NEOの早期発見と軌道導出を行うスペースガード観測が世界各地で行われており、現在では1万を超えるNEOが発見されている。美星スペースガードセンターは国内唯一のスペースガード観測に特化した施設であり、NEOを始めとする太陽系小天体の発見、追観測、科学観測を行っている。本稿では、スペースガード観測の現状と、美星スペースガードセンターで行われている実際の観測、さらに将来の展望について紹介する。

1. スペースガード観測

1994年に起こったシューメーカー・レビー第9彗星の木星衝突を一つのきっかけとし、彗星や小惑星といった太陽系小天体が地球へ衝突する脅威について広く認識されるようになった。そして、2013年2月15日のチェリャビンスク隕石落下により、衝突の脅威はより現実的なものであると改めて知らされた。スペースガードとは、地球へ接近する太陽系小天体(Near Earth Object=NEO)に対する発見、衝突回避の研究を行う活動である。このうちNEOの発見観測(以下、スペースガード観測)は、1990年頃より様々な観測プロジェクトにより実施されている。初期のスペースガード観測の国際的な目標は、地球に衝突すれば人類存続に致命的な影響を与える、直径1 km以上のNEOの90%を発見することと設定された[1][2]。現在までのNEOの発見数を表1にまとめる。861天体が直径1 km以上(絶対等級で17.75等級以上に相当)のNEOである。これはサイズ分布から推定される直径1 km以上のNEO数のほぼ90%に達しており、初期の目標は達成されたと言える。一方、直径1 km以下のNEOであっても、国/都市レベルの壊滅をもたらすには十分

なエネルギーを有している。今後は、2030年頃までに直径140 m – 1 km(絶対等級で17.75 – 22.00等級に相当)のNEOの90%を発見することが、新たな目標として設定されている[3][4]。チェリャビンスク隕石の元になったNEOの直径は約20 mと推定されている[5]。この大きさのNEOは、地球に非常に近づいたタイミングで、運良くサーベイ網にかかることでしか発見できないのが現状である。

将来地球に接近するNEOの状況について述べる。2013年10月25日時点では、2010 RF₁₂が2095年9月5日に地球に衝突する確率が最も高く、8.1%である。しかし万が一衝突したとしても、このNEOの推定直径は7 mであり被害はほとんど起こらない。この直径は唯一落下予測に成功した2008 TC₃と同程度である[6]。NEOの危険性を評価する為には衝突確率だけでなく、衝突エネルギー(NEOの直径や衝突速度)を考慮しなければならない。直径が比較的大きいNEOのうち、衝突確率が高いものは1999 RQ₃₆(=101955) Bennu, 2007 VK₁₈₄, 2009 FDである。これらのNEOの推定直径はそれぞれ560 m, 130 m, 130 m, 衝突確率は0.054%, 0.055%, 0.18%, 最接近日時は2182年9月24日, 2048年6月3日, 2185年3月29日である。さらに、ごく最近になって、2013 TV₁₃₅が発見された。このNEOの推定直径は440 m, 衝突確率は0.031%, 最接近日時は2032年8月26日である。かつて、地球

1. 日本スペースガード協会

2. 宇宙航空研究開発機構

3. 情報通信研究機構

urakawa@spaceguard.or.jp

表1：2013年10月7日時点でのNEOの発見状況

(<http://www.iau.org/public/themes/neo/nea/>). 発見数の括弧内は、2178年までに地球に0.05AU以内に接近する天体 (Potentially Hazardous Asteroids = PHA) の数。アルベド=0.15を仮定.

直 径 D (m)	> 1000	1000 - 140	140 - 40	40 - 1	全 体
絶 対 等 級 H	< 17.75	17.75 - 22.00	22.00 - 24.75	> 24.75	
推 定 存 在 数	966±45	～ 14000	～ 285000	---	---
発 見 数	861 (155)	4923 (1260)	2614	1909	10307 (1415)
発 見 割 合	89%±4	～ 35%	～ 1%	---	---

表2：主な観測プロジェクト

プロジェクト名	場所	口径	F値	視野
Spacewatch	アメリカ アリゾナ	0.9 m 1.8 m	3.0 2.7	1.9°×1.8° 0.6°×0.6°
LINEAR/GEODSS	アメリカ ニューメキシコ	1 m×2	2.2	1.2°×1.6°
CSS	アメリカ アリゾナ	68 cm	1.9	2.9°×2.9°
	アメリカ アリゾナ	1.5 m	2.0	1.1°×1.1°
	オーストラリア ニューサウスウェールズ	1.0 m	3.5	2°×2°
Pan-STARRS (PS1)	アメリカ ハワイ	1.8 m	4.4	φ 3.0°
ADAS	イタリア アシアゴ	67 cm	3.2	0.8°×0.8°
LSSS	スペイン ラサグラ	45 cm×3	2.8	1.6°×1.6°
TOTAS	スペイン テネリフェ島	1 m	4.5	0.7°×0.7°
KLENOT	チェコ Klet'	1.1 m	2.7	0.55°×0.55°
YSTAR, NEOPAT	韓国	50 cmなど		2°×2° など

への衝突が話題となった小惑星アポフィスの衝突確率は無視できる程小さくなっている。衝突確率が減少した要因は、追観測で軌道精度が向上した為である[7]。NEOの発見情報や軌道情報はMinor Planet Center (MPC)^{注1}やNASA/JPLのNear Earth Object Program^{注2}に詳しく紹介されている。

2. 世界のスペースガード観測

NEOの発見を行っている観測プロジェクトは、発見数のほとんどを占めるLINEAR(Lincoln Near Earth Asteroid Research), CSS(Catalina Sky Survey)などの大規模サーベイグループとそれ以外に大きく分けることができる。大規模サーベイはすべてアメリカ合衆国における組織であり、事実上、アメリカにおける大規模サーベイとそれ以外の国での小規模サーベイに分かれる。1990年代～2000年代初頭にかけての代表的な観測プロジェクトは、LINEAR, NEAT (Near-Earth Asteroid Tracking), Spacewatchなどである。これらのプロジェクトは口径1 mクラスの望遠

鏡に広視野CCDカメラの組み合わせというシステムで観測を行っている。現在のスペースガード観測の中心は、CSSとPan-STARRS(Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System)に移っている。CSSはアリゾナ州ツーソンのSteward天文台を中心に、同じアリゾナ州のレモン山天文台とオーストラリアのSiding Spring天文台で連携して行っているプロジェクトである。2013年の前半期までに4500を超えるNEOを発見している。Pan-STARRSは、ハワイ・ハレアカラ山頂で行われているサーベイプロジェクトである(NEOの発見だけを目的としていない)。口径1.8 m望遠鏡と広視野カメラからなる観測システムで、約7平方度(直径3度の円形状視野)の領域を一度に撮像する事ができる[8]。計画ではこの観測システムを4台稼働させる予定であり、2010年からプロトタイプを兼ねた1台目(PS1)での本格稼働が始まっている。現在、PS1だけで年間のNEO発見数の約半分を占めるまでになっているが、さらに2台目のPS2も完成している。アメリカ以外では、イタリア、スペイン、チェコ、韓国などで観測が行われている。一例として、スペインのLSSS(La Sagra Sky Survey)では、チェリヤビンスク隕石落下の翌日に地表から27700 kmの距離まで接

注1：<http://minor.planetcenter.net>

注2：<http://neo.jpl.nasa.gov>

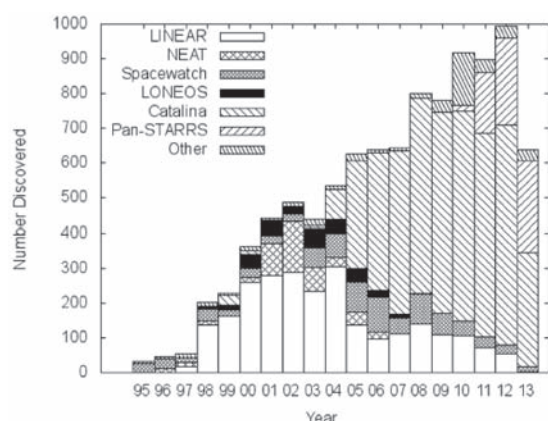


図1：観測プロジェクト別のNEO発見数の推移(MPCの公開データ、<http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html>より作成)。2013年は9月7日までの発見数。

近した2012 DA₁₄を発見している。主な観測プロジェクトを表2にまとめる。

近年では、宇宙からの観測も実施されている。NASAの宇宙望遠鏡WISE(Wide-field Infrared Survey Explorer)は、口径40 cmの赤外望遠鏡であり、その観測波長は3.4 μm 、4.6 μm 、12 μm 、22 μm である。冷却剤がなくなり当初の観測計画は終了したが、冷却なしでも比較的問題の少ない3.4 μm 帯と4.6 μm 帯を用いたNEOサーベイをNEOWISEと名付け運用期間を延長して実施した。WISEによる観測で129のNEOが発見された。また、直径1 km以下のNEOのサイズ分布の再調査を行い、これまで予測されていたより、直径1 km以下のNEOが少ない事を明らかにした[9]。延長運用は2011年2月に終了したが、チェリヤビンスク隕石落下により、スペースガード観測の重要性が再認識され、2013年9月に再運用を行うという発表があった。図1は観測プロジェクト別のNEOの発見数を示す。1990年代後半から2000年代初頭にかけて主要なプロジェクトであった、LINEARやNEATでの発見数は近年減少しており、CSSやPan-STARRSによる発見数が増加している。2010年に「Other」が急増しているが、これはWISEによる発見である。

3. 日本におけるスペースガード観測

日本におけるスペースガード観測は、岡山県井原市美星町の美星スペースガードセンター(以下、BSGC

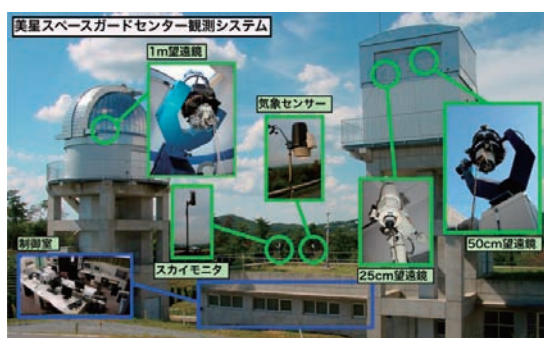


図2：美星スペースガードセンター観測システム

注3)で2000年から開始した[10]。BSGCは、口径1 m望遠鏡、口径50 cm望遠鏡、口径25 cm望遠鏡からなり、通常は口径1 m望遠鏡と口径50 cm望遠鏡を用いて観測を実施している(図2)。口径1 m望遠鏡の検出器は4096 × 2048ピクセルの4枚のCCDからなり、その視野は約2.6平方度である。口径50 cm望遠鏡の検出器は2048 × 2048ピクセルのCCDであり、その視野は約2.8平方度である。BSGCでは、NEOとともにスペースデブリの観測も行っている。観測は6人の観測者により、2人1組の交代制で、午後6時から翌朝午前6時まで365日体制で行っている。メインとなる口径1 m望遠鏡は2002年に完成し、その後も改良と改修を重ねて2007年から十分な性能を発揮できるようになった。これまでのNEOの発見は、25 cm望遠鏡による2000 UV₁₃(=20826)と1 m望遠鏡による2007 YZの2天体に留まっている。

BSGCにおけるNEOの観測の実際について述べる。NEOは、メインベルト小惑星と異なり、黄道面付近に存在しているとは限らない。しかし、それでも存在確率は黄道面付近が一番高い。従って、黄道面付近の衝の位置を観測するとNEOを発見しやすい。ただし、この領域は他の観測プロジェクトも観測するため、BSGCではやや高黄緯の領域を観測することが多い。このようにして決めた領域を一晚に4回程度撮像し、その4枚の画像をバラバラ漫画のように比較する事で、NEOの検出を行う。恒星は視野内で動かないが、NEOは移動する。これをブリンク法という。BSGCでは、移動天体の検出を目視で行っている。これは、他の観測プロジェクトと比較して劣っている限界等級

注3：BSGCの施設は、一般財団法人日本宇宙フォーラムが所有し、日本スペースガード協会(JSGA)が観測を行っている。

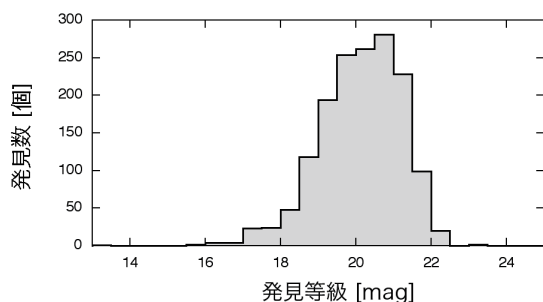


図3：NEOの発見等級の分布(MPCの公開データ，<http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html>より作成)。現在では、短時間の露出で20等級を検出できなければNEOの発見は困難である。

を補うためには、ノイズと同レベル程度の信号を判別することが可能な目視による検出が必要だからである。一般に、NEOはメインベルト小惑星より天球上での動きが速い。また、その動きの速さや方向は決まっていない。このような条件は、NEOを発見するために、長時間の露出をかけて限界等級を上げる事は難しく、30秒から60秒程度の短い露出時間で観測を実施する必要があることを示す。BSGCの場合、30秒露出を行った場合の典型的な限界等級は18等級である。この限界等級で発見できるような、大型のNEOの大半は発見されている。図3は2012年以降のNEOの発見時の等級を示す。現在のNEOの発見時の等級は20.5等級にピークがある。また、図4は発見されたNEOの絶対等級(直径に相当)の年次推移を示す。ごく稀に絶対等級16等程度(～直径2 km)のNEOが発見されるものの、平均すると年を経るごとに発見されるNEOの直径は小さくなっている。現在では絶対等級22.5等(～直径100 m)のNEOの発見が多い。従って、現在ではBSGCでNEOを発見する事は困難な状況であり、NEOの発見を目指した積極的な観測は行っていない。一方、Pan-STARRSなどで発見されたNEOの暫定的な軌道情報はMPCのNEO Confirmation Page^{注4}で公開される。この暫定的な軌道に基づきNEOの動きに合わせて望遠鏡を追尾させれば、長時間の露出が可能となり、BSGCでも暗いNEOを検出することが可能となる。このような、即時追観測はNEOの正確な軌道導出をする上で重要である。例えば、2013年9月2日までの一年間に月軌道の5倍以内の距離まで地球に

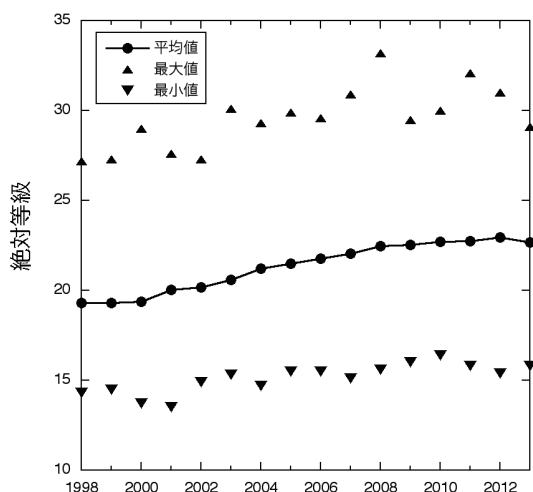


図4：発見されるNEOの絶対等級の年次推移(MPCの公開データ，<http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html>より作成)。

近づいたNEOは110天体ある。このうち107天体が発見前後の数日の間に地球へ最接近している。発見されたNEOが次の回帰で必ず観測できるとは限らない(多くの場合、大型望遠鏡でも観測不可能な25等級以下になる)。従って、BSGCのような常に観測体制にある観測所において即時追観測を実施し、可能な限り正確に軌道を求めておくことが重要である。NEOの追観測に加え、既知のNEOであっても軌道精度を改良するためにある程度の期間ごと(典型的には数ヶ月から数年程度毎)に位置測定観測を実施する必要がある。

表3：美星スペースガードセンターで実施した観測のうち、Minor Planet Centerへ報告した天体数の推移。即時追観測を実施したNEO数とは、NEO Confirmation Pageに公表されたNEO候補天体に対する観測数である。発見候補天体は、観測時点において未発見であった太陽系小天体であり、主にメインベルト小惑星である。MPCに集約されている過去のデータとの精査の結果、必ずしもすべての発見候補天体が発見とならない。BSGCで発見したNEO、2007 YZ⁺は2007年の発見候補天体に含まれる。2010年よりNEOCP天体の即時追観測に観測の重点を移している。

年	即時追観測を実施した NEO数	観測をした 既知の NEO数	発見候補 天体数
2012	189	76	40
2011	212	97	133
2010	192	132	503
2009	39	13	1417
2008	24	14	301
2007	7	22	511

注4：http://www.minorplanetcenter.net/iau/NEO/toconfirm_tabular.html

月明かりがあり、暗いNEOの検出が難しい状況下では、この種の観測もBSGCで実施している。2007年以降、BSGCで行った観測の状況について表3にまとめる。

2007年よりBSGC 1 m望遠鏡には、SDSSのg, r, i, zフィルターと、860 nmと1020 nmに中心波長を持つ狭帯域フィルターが導入された。これらのフィルターを用いる事で多色測光による小惑星のスペクトル型決定といった科学観測が可能となった。また従来から、ライトカーブ観測は可能である。これまで、イトカワや1999 JU₃のような探査天体のライトカーブ観測や、107P/Wilson-Harringtonのライトカーブ観測及び多色測光観測を実施してきた[11][12]。BSGCでは365日観測体制にあるので、太陽系小天体の突発現象にも即時対応できる。この利点を生かした科学観測を今後も行う予定である。BSGC以外での国内における小惑星の観測状況について述べる。常時の観測体制にはないものの、JAXA入笠山観測所で小惑星の観測が行われている。また、アマチュア天文家も観測を実施している。特に、世界各地の大規模サーベイプロジェクトが本格的に稼働するまで、小惑星の発見報告数は日本のアマチュア天文家が世界をリードしてきた。小惑星の発見報告は、MPCに集約される。未知の小惑星は、2日分の観測でその存在が確認されて初めて発見と認められる定義であった(2010年3月まで)。特定の天球上の領域を2日に渡り望遠鏡を向けるような入念な観測は、アマチュア天文家の得意とするところであり、十分な観測技術を有した日本のアマチュア天文家の貢献は非常に大きかった。しかし、MPCは1夜だけの観測報告を認めるようになった(2010年4月より)。さらに、その後の追観測で小惑星を確認できた時、発見者は最初に1夜目の観測を行った者と定義が変更された。この変更により、小惑星の発見はほとんど大規模サーベイプロジェクトのものとなり、アマチュア天文家の楽しみはなくなってしまった。著者自身の印象では、この変更は、様々な観測プロジェクトによるNEOの発見の増加に伴い「効率的なスペースガード観測のために世界中の観測者が協力すべき」というMPCの姿勢を反映したものであり、スペースガード観測の点では良かったと思っている。しかし、結果として小惑星の発見を行うアマチュア天文家が減少してしまった。もっとも、小惑星のライトカーブ観測に重点を移した者もあり、その分野で素晴らしい貢献を引き続き行っ

ている[13]。

4. 今後のスペースガード観測

チェリャビンスク隕石落下により、改めてスペースガードの重要性が認識されたように思う。しかし、現状ではチェリャビンスク隕石の元になったような小型のNEOの網羅的な発見は難しく、今後15 - 20年の期間で、直径140 m - 1 kmのNEOの90%を発見し、軌道決定しようという段階である。Pan-STARRSに加え、計画 中 であるLSST(Large Synoptic Survey Telescope)では、口径8.4 m、視野9.6平方度の観測システムでサーベイ観測を実施する予定である。ここでもNEOの発見が重要な観測テーマとして提案されている。また、すばる望遠鏡Hyper-Suprime Camや検討が開始された宇宙望遠鏡WISH(Wide-field Imaging Survey for High-redshift)など、今後行われる大規模サーベイ観測でもNEOの検出が期待できる。この他にも、太陽方向から飛来するNEOの発見を目的として、カナダ宇宙庁により宇宙望遠鏡NEOSSat(Near-Earth Object Surveillance Satellite)が打ち上げられた。また、宇宙望遠鏡NEOCam(Near-Earth Object Camera)がNASAで検討されている。このような宇宙からのスペースガード観測も今後、重要な役割を果たすであろう。

一方、日本スペースガード協会においては上述したような観測を行ってきたが、1 mという望遠鏡の口径は、直径140 m - 1 kmのNEOの発見を行うには力不足な感は否めない。この状況を変えるには、次世代の望遠鏡が必要不可欠である。現在、我々は次期望遠鏡の検討作業を行っている。スペースガード観測には、それ相応の資金や人的資源が必要である。しかし、これは人類存続に対する保険のようなものであると思う。今後ともスペースガード観測の発展のため、協力、理解を頂ければ幸いである。

参考文献

- [1] Shoemaker, E.M. ed., 1995, Report of the Near-Earth Objects Survey Working Group. NASA, Washington DC. (Available on line at <http://impact.arc.nasa.gov/>)
- [2] Morrison, D. et al., 2002, in Asteroids III, ed. W. F.

- Bottke Jr. et al. (University of Arizona Press, Tucson), 739.
- [3] Morrison, D. ed., 2006, Report of NASA NEO Workshop. NASA, Washington DC. (Available on line at <http://impact.arc.nasa.gov>.)
 - [4] Report to Congress, Near-Earth Object Survey and Deflection Analysis of Alternatives, 2007, NASA.
 - [5] Boslough, B., 2013, DPS meeting abstract 45, 110. 01.
 - [6] Scheirich, P. et al., 2010, Meteorit. & Planet. Sci. 45, 1804.
 - [7] Bancelin, D. et al., 2012, A&A 544, id.A 15.
 - [8] Kaiser, N. et al., 2010, Proceedings of SPIE 7733, article id. 77330E.
 - [9] Mainzer, A. et al., 2011, ApJ 743, 156.
 - [10] Isobe, S., 1999, Adv. Space Res. 23, 33.
 - [11] Muller, T. G. et al., 2011, A&A 525, 145.
 - [12] Urakawa, S. et al., 2011, Icarus 215, 17.
 - [13] Hamanowa, H. et al., 2009, The Minor Planet Bulletin 36, 87.