

宇宙望遠鏡による衝突危険天体の検知・ 警報システムコンセプトについて



池 永 敏 憲

〈宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1〉

e-mail: ikenaga.toshinori@jaxa.jp

昨今、地球接近小天体の地球衝突に起因する災害の防止・軽減に対する対策が活発に議論されている。恐竜絶滅を引き起こした巨大隕石の衝突に代表されるように、天体衝突が引き起こす災害への脅威は古くから認識されていた。特に第二次世界大戦後、人類が人工物を宇宙へ輸送する技術を獲得したことにより宇宙への関心が高まり、これらの宇宙起因の災害に対する議論が具体化し、国際連合は地球接近小天体の国際監視網である IAWN (International Asteroid Warning Network)、及び、被害軽減のための実際のミッションの企画を行う SMPAG (Space Mission Planning Advisory Group) を設立した。このような状況の中、本稿では、宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)において独自に検討を実施している、宇宙望遠鏡を用いた衝突危険天体の検知・警報システムのコンセプトについて紹介する。

1. 概 要

小惑星の地球衝突がもたらす被害については、古くから認識、議論されてきた。特に、およそ6,500万年前の白亜紀末に発生した恐竜の大量絶滅が、約10 km級の巨大隕石の衝突によりもたらされたことは広く知られている。近代文明が発達した20世紀初頭に発生したロシア・ツングースカ事案は、人類に地球接近小天体(NEO: Near Earth Objects)による災害の脅威が今もなお存在することを認識させた。

1957年、人類初の人工衛星を旧ソ連が打上げたことにより、人類は宇宙空間への輸送手段を獲得した。その後の宇宙開発の長足の進歩が、これらの地球接近小天体起因の災害への具体的な対処方法に関する議論を活発化させたといつてよいだろう。

NEOの衝突による災害への対策は、大きく3つのフェーズに分けられる。1. 地球接近小天

体の発見・カタログ化、2. 衝突確率が高い天体に対するその場観測、3. 軌道変換、である。

そもそも小天体群がどういう軌道に、どういう分布で存在しているのかを知らなければ、衝突の可能性自体、論じることはできないため、フェーズ1はこれらの災害軽減を考える上において出発点となる。この小天体のカタログ化に関しては、地上望遠鏡に加え、昨今ではNEOWISEのような、NEOのカタログ化に特化した宇宙望遠鏡も用いられる¹⁾。図1にNEOの推定サイズ分布、及び発見数を記す[Harris, 2014]²⁾。図1の“□”の点は、推定される小天体の個数分布を示しており、一番下の目盛は小天体のサイズを示す。“□”の点に、サイズ1 km以上の範囲で接している実線が、現時点で実際に発見されている個数を示している。図1より、天体サイズが1 kmを下回る辺りから、発見されていない天体が存在することが分かる。

前述のとおり、天体のカタログ化はNEO災害

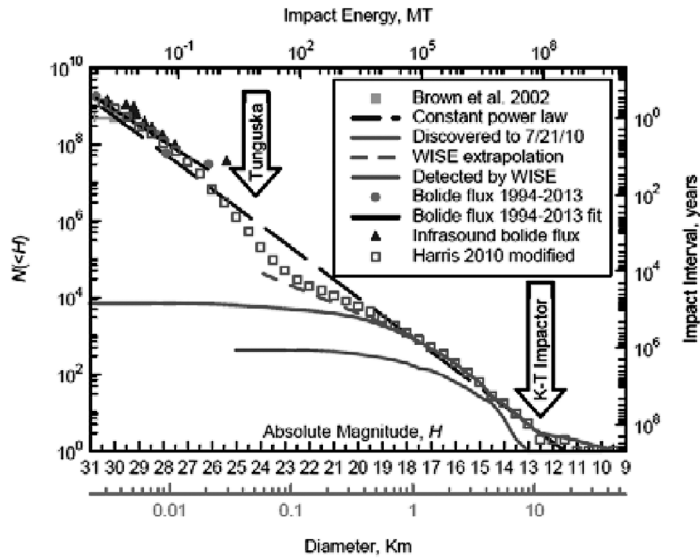


図1 NEOの推定サイズ分布, および発見数²⁾.

軽減の第一歩となる重要な事項であり、米国議会はNASAに対して、2020年までに140 m以上のサイズの小天体の90%以上をカタログ化するように指示している³⁾。また、国際連合においても、2013年に地球接近小天体の国際的観測網IAWN (International Asteroid Warning Network) を設立している⁴⁾。

このカタログ化の結果、地球への衝突の確率が高いものと判断された天体に関しては、フェーズ2に挙げた、探査機による詳細なその場観測に移行する。探査機を小天体に向かわせ、その近傍を飛翔させることで、探査機に搭載された航法機器を用いて、当該小天体の軌道を精密に推定することができる。これにより、衝突時期、衝突確率を高精度に把握する。これらの情報から、地上では、万一、衝突が不可避となった場合の避難計画等が立案されることになるだろう。一方、軌道の高精度推定に加え、探査機の観測機器を用いて、小天体表面の形状、組成、質量分布等が割り出され、当該小天体の軌道をもっとも効率的に変換する方法の検討が実施される。

フェーズ2の探査の結果、当該小天体の衝突が

表1 天体サイズによる衝突事象の分類。

直径	発生事象	衝突エネルギー	頻度
25 m	空中爆発	1 MT*	1回/200年
50 m	限定的範囲の被害	10 MT*	1回/2000年
140 m	比較的広範囲の被害	300 MT*	1回/30000年

* MT=Mega-Ton. TNT爆薬換算。

不可避と判断された場合、当該小天体の軌道を変換するミッションが立案・実行される^{5),6)}。これがフェーズ3となる。小天体の軌道変換に関しては様々なアイデア、研究がなされているが、その場観測の結果、及び衝突までの猶予期間等を勘案し、もっとも適切な方法が選択されるであろう。

本稿で紹介するミッションコンセプトは、上記の3つのフェーズでは、フェーズ1に相当する。但し、従来のコンセプトと大きく異なる点は、本ミッションが比較的小サイズの天体の接近検知、警報発出に特化している点である。表1に天体サイズによる衝突事象の分類を抜粋する³⁾。

小サイズの天体はカタログ化が難しいが、分布数が多いため衝突頻度は高くなる。その一方、衝突時の被害は限定的となる。よって、天体衝突の数日前にその接近を検知し、軌道を推定すること

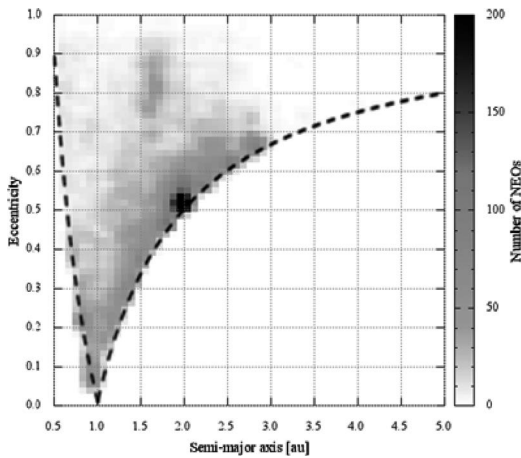


図2 a-eマップ上でのVI分布.

で衝突地域の予測を行い、当該地域に避難警報を発出することで、人的被害を軽減することが、本ミッションコンセプトの主目的である。

2. 仮想衝突天体

本ミッションコンセプトの有効性を確認するため、観測バイアスのない、現実に近いNEO分布モデルの一つである Bottke モデルを用いて仮想衝突天体 (VI: Virtual Impactor) の軌道群を生成する [Bottke, 2002]^{5), 7)}。図2に、a-eマップ上でのVI群の分布を示す。なお、aは軌道長半径、eは離心率を示す。図2中の波線は、近日点もしくは遠日点で地球軌道に接する条件を示しており、波線よりも上の領域は、もし軌道傾斜角がゼロの場合、地球軌道と交差することを意味する。

また、図3にVIの軌道例を太陽-地球固定系で表示したグラフを示す。

表2は、図3の凡例に対応する天体の軌道情報をまとめる。表2中にある軌道長半径の単位“au”は“astronomical unit”の略で、天文単位と呼ばれる。1 auはおおよそ太陽-地球間距離に相当し、約1.5億kmに相当する。

図3の例では、地上望遠鏡で発見の難しい、太陽側から衝突する天体を例として挙げている。な

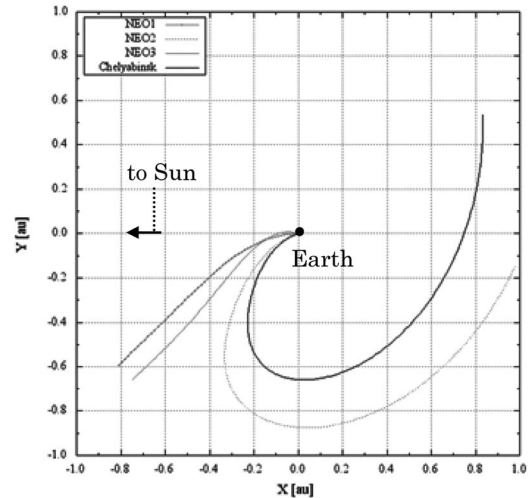


図3 太陽-地球固定系でのVI軌道例.

表2 軌道の主要パラメータ値.

Name	軌道長半径	離心率	軌道傾斜角
NEO1	3.39 [au]	0.83	7.50 [deg]
NEO2	2.70 [au]	0.71	2.50 [deg]
NEO3	0.92 [au]	0.28	2.50 [deg]
Chelyabinsk	1.77 [au]	0.53	3.44 [deg]

お、凡例の“Chelyabinsk”は、ロシア・チェリャビンスクに落下した天体の推定軌道要素から生成したものである⁸⁾。

3. 検出シミュレーション

前章で生成したVI群を基に、検出シミュレーションを行った結果を紹介する。本ミッションコンセプトでは、宇宙望遠鏡を用いるが、宇宙望遠鏡の設置ポイントを、地球軌道上の異なる位相上に定める。図4に模式図を記す。

太陽、地球重力を考慮した3体問題においては、図4に示した宇宙望遠鏡の設置ポイントを維持するためには連続的な加速度が必要となる。このように、連続的な加速度を人工的に付加することにより維持されるポイントを、人工平衡点 (AEP: Artificial Equilibrium Point) という⁹⁾。AEPの維持に必要な加速度は、AEPの位相角 α により

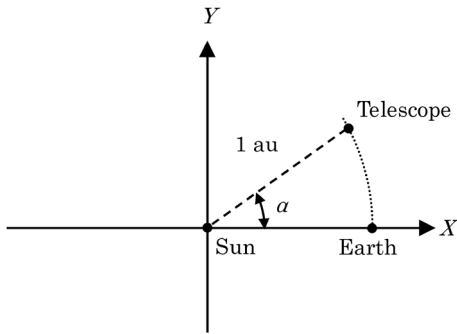


図4 宇宙望遠鏡の設置ポイント.

表3 衝突までの飛行期間.

地球からの距離	平均飛行時間	最小飛行時間
0.5 au	22.7 days	18.1 days
0.4 au	20.2 days	14.7 days
0.3 au	16.9 days	11.1 days
0.2 au	12.7 days	7.5 days
0.1 au	6.9 days	3.8 days

異なるが、本検討で設定した $\alpha=5\text{--}15^\circ$ の範囲では、 $0.3\text{--}2.3 \mu\text{m/s}^2$ 程度となる。これは、ミッション期間10年とすると、総 ΔV 量=95–725 m/s程度に相当する。加速度のオーダ的には、ソーラーセイルで達成可能と考えられ、その場合は推薬量ゼロとなるが、仮にHayabusa級の電気推進（比推力=3000秒程度）を用いる場合、10年間での総消費推薬量は、探査機総質量の0.3–2.4%程度となるため、探査機リソースの観点では、十分に達成可能と考える¹⁰⁾。

宇宙望遠鏡は、AEPより、地球を視野中心に据えつつ、半値幅 30° の領域を観測する。AEPの位相角 α の値に依存するが、AEPから地球方向を観測することで、地球を中心とした半径0.1 au程度を観測視野内に収めることができる。これにより、視等級が十分に小さければ、地球衝突の0.1 au程度前の時点でNEOの地球接近を検知できる。これは地球衝突までの期間で表現すると、平均で約7日前、最短ケースで約4日前に相当する。表3に地球–NEO距離と衝突までの飛行期間

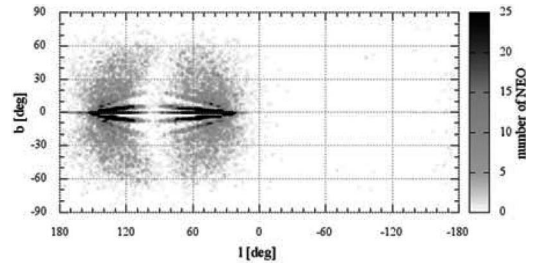


図5 望遠鏡視野における0.1 au半径のNEO群 ($\alpha=5^\circ$).

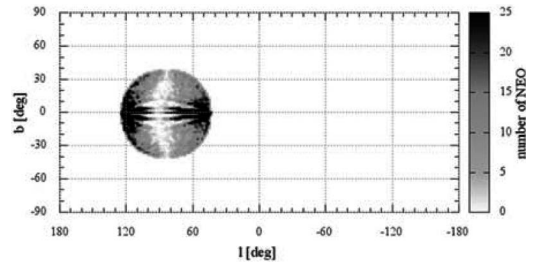


図6 望遠鏡視野における0.1 au半径のNEO群 ($\alpha=9^\circ$).

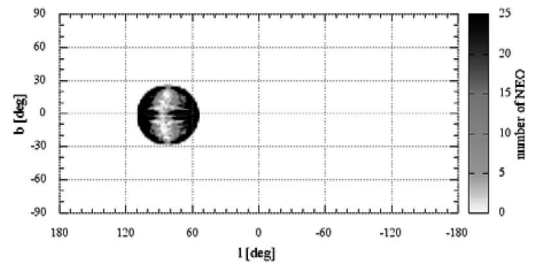


図7 望遠鏡視野における0.1 au半径のNEO群 ($\alpha=13^\circ$).

をまとめる。

1908年のツングースカ事案では、衝突事象により15–20 km四方の木々がなぎ倒されたとされる¹¹⁾。一方、上記に相当する面積の住民の避難に要する時間については、原子力災害を想定した内閣府による研究結果が公開されており、その結果によると、およそ18時間程度で90%の住民が避難できると推定される¹²⁾。それらを踏まえたうえで、本検討では、地球から0.1 auの地点でのNEO検出率を評価している¹⁰⁾。

図5–7に、地球から0.1 auの地点におけるVI群の分布を望遠鏡視野マップ上で示す。図5–7は黄経黄緯 (l & b) で示しており、中心は太陽方

向に相当する。 $b=0^\circ$ の面は黄道面である。 図4の模式図より、地球はほぼ $l=90^\circ$ に位置することとなる。 AEP位相角が 5° のケースでは、地球-宇宙望遠鏡間の距離が 0.09 au 程度であり、 0.1 au の球の中に望遠鏡自身が位置するため、図5のように、望遠鏡視野上において、広範囲にNEOが分布することとなる。

一方、地球-宇宙望遠鏡間の距離が 0.1 au より大きくなる図6, 7のケースでは、地球を中心とした 0.1 au の球状となっているNEO群を、その外側から捉えることになる。 望遠鏡の観測領域を半値幅 30° と想定すると、AEP位相角が 10° より大きければ、すべてのNEO群をその観測視野に収めることになる。

一方、観測視野内にあるNEOが存在しても、すべてを検知できるとは限らない。 本検討では可視望遠鏡の使用を仮定しているが、その場合、望遠鏡の検出性能よりもNEOの視等級が小さい値でなければ（すなわち、NEOが十分に明るくなければ）検出することはできない。 よって、本検討では、VI群のサイズを、表1の分類に従って 25 m 、 50 m 、及び 140 m の3種類にそれぞれ統一し、検出率を評価した。

本解析では、あるエポックにすべてのVI群が地球に衝突することとし、その時点での状態量が

ら逆伝搬して、地球から 1.0 au に達した時点で軌道伝搬を止める。 VI群の総数は、前述のとおり約 $25,000$ 個である。 次に、VI群を順伝搬して地球に接近させると同時に、望遠鏡から見た場合の視等級を計算し、観測領域内及び視等級の観点から可観測性を評価している。

図8-10に、各サイズでのVI群に対する検出率の履歴を示す。 図内の凡例は、AEP位相角を表す。 望遠鏡の性能としては、1秒積分で22等級と設定した。 本稿では、1秒積分での検出等級を J_1 と表記する。 最新の 1.5 m 口径近赤外望遠鏡 WISHが、1秒積分でおよそ23等級程度となるため、現状の技術で達成可能な性能と考えている。 また、検討では、望遠鏡視野を $2^\circ \times 2^\circ$ と想定して

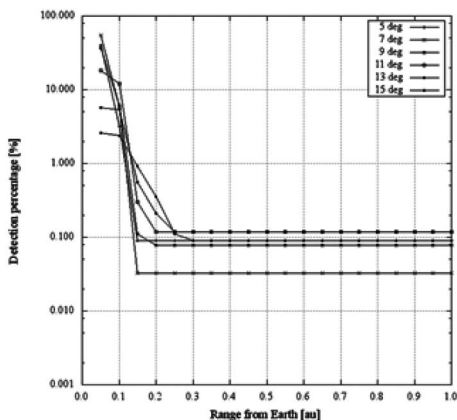


図8 25 meter サイズのVI群に対する検出率履歴。

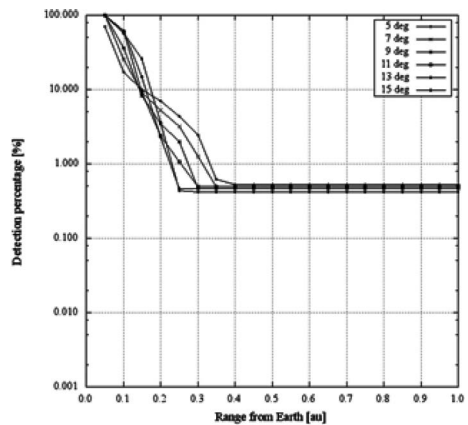


図9 50 meter サイズのVI群に対する検出率履歴。

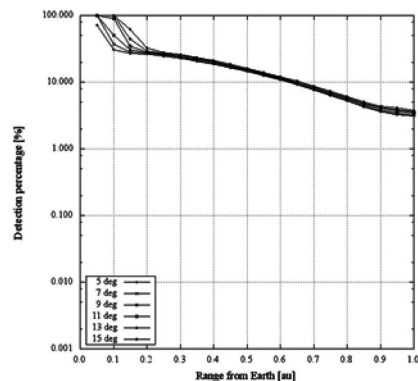


図10 140 meter サイズのVI群に対する検出率履歴。

おり、1日に一度、半値幅30°の領域を観測することとしており、1視野当りの積分時間は約125秒となる。

図8, 9を見ると、チェリャビンスク隕石に相当する25 mサイズ、及びツングースカ隕石に相当する50 mサイズでは、約0.3 auから急激に検出率が増加する。これは、VI群の地球接近に伴い望遠鏡の観測領域に入る数が増加するのと同時に、望遠鏡-NEO間の距離が短くなることで視等級が小さくなることが要因である。一方、図10の140 mサイズにおいては、その絶対等級が十分に小さいことから、検出シミュレーション開始時点、すなわち、地球から1.0 au時点で、視等級の観点からは可観測となっているものが多く、検出率の増加は、観測領域内に入るかどうかにはほぼ依存する。そのため、25, 50 mの場合と異なり、ほぼ連続的に検出率は増加する。

表4に、NEOが0.1 auに達した時点での検出率をまとめる。表4の結果から、地球から0.2 au程度離れた、 $\alpha=11-13^\circ$ 程度であれば、50 mサイズの約60%、140 mサイズに関してはほぼ100%検出できることが分かる。一方、25 mサイズに関

表4 0.1 au地点における検出率まとめ ($J_1=22$)

α [deg]	25 m	50 m	140 m
5.0	3.2%	17.2%	30.8%
7.0	5.9%	25.2%	36.7%
9.0	6.1%	35.9%	50.6%
11.0	12.1%	59.9%	90.1%
13.0	5.4%	61.6%	99.9%
15.0	2.6%	57.2%	99.9%

表5 0.1 au地点における検出率まとめ ($J_1=24$)

α [deg]	25 m	50 m	140 m
5.0	18.5%	30.9%	30.9%
7.0	28.9%	36.8%	36.9%
9.0	47.8%	50.6%	50.7%
11.0	88.9%	90.0%	90.0%
13.0	99.8%	99.8%	99.9%
15.0	99.8%	99.8%	99.9%

しては、最大でもおよそ10%程度の検出率であり、チェリャビンスク隕石レベルの天体の接近検知には不十分である。

一方、 $J_1=24$ に向上させた場合の検出率を表5にまとめる。これはWISHを上回る性能であり、高性能検出器の新規開発が必要になると推測される。 $J_1=24$ まで向上できれば、25 mサイズのNEOも、ほぼ100%検出できる。

4. 最後 に

本稿では、人工平衡点を利用した、新しい概念の地球接近小天体監視ミッションについて紹介した。本ミッションは、世界的に関心が高まっている、地球接近小天体の地球衝突に起因する災害軽減を目的としたものであり、特に事前の発見・カタログ化が困難な、ロシア・チェリャビンスク隕石級の小天体の接近を検知することを主たる目標としている。接近を検知後、小天体の軌道・落下域を推定し、避難警報を発出することで人的被害の軽減が期待できる。可視望遠鏡を想定した検出シミュレーションの結果、現状期待できる検出性能においては、ツングースカ隕石級となる50 mの約60%、また、1秒積分での検出等級が24等級まで向上できれば、チェリャビンスク隕石級に相当する25 mサイズの小天体をほぼ100%検知できることが分かった。

国際的な枠組みが構築されつつあるプラネタリ・ディフェンスの分野において、日本独自のミッションコンセプトを検討・提案することは、日本の国際的存在感を高めるだけでなく、純粋に地球環境・生命の保護に資するミッションを考案するという意味でも、重要と考えている。今後も検討、研究を継続し、具体的なミッションの実現につなげたいと考えている。

謝 辞

本稿で紹介した研究は、多くの共同研究者の貢献に支えられている。JAXA 研究開発部門の歌島昌由氏、杉本洋平氏、池田人氏、JAXA 宇宙科学研究所の石井信明教授、吉川真准教授、また、フランスの École Polytechnique 大学よりインターン生として研究に参加して下さった Martin Jocqueviel 氏、Alessandro Takeshi Morita Gagliardi 氏に、この場を借りて深く感謝申し上げたい。

参考文献

- 1) Mainzer A., et al., 2011, The Astrophysical Journal 743, 156 (17 pp)
- 2) Harris A., 2014, Asteroid Grand Challenge, Seminar Series
- 3) National Research Council of the National Academies, 2010, The National Academies Press
- 4) Camacho S., 2014, MPC, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics
- 5) Sugimoto Y., 2014, Ph.D. Dissertation, University of Glasgow, 2014
- 6) 山口皓平, 山川宏, 2013, 日本航空宇宙学会, 航空宇宙技術, Vol. 12, pp. 79-88
- 7) Bottke Jr., et al., 2002, Icarus 156, 399-433
- 8) Emel'yanenko V. V., et al., 2013, Solar System Research, Vol. 47, No. 4, pp. 240-254
- 9) Morimoto M., Yamakawa H., Uesugi K., 2006, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 29, No. 5, September-October
- 10) Ikenaga T., et al., 2016, 67th International Astronautical Congress, IAC-16-A3.IP.1.x34377
- 11) Chyba F. C., et al., 1993, Nature, Vol. 361, 7 January
- 12) 内閣府 (原子力防災担当), 2016, 内閣府, 平成28年4月11日
- 13) Ikenaga T., et al., 2016, Transaction of JSASS Aero-space Technology, Vol. 59, No. 4, pp. 243-250
- 14) Zugulaga J. I., Ferrin I., 2013, Cornell University Library.
- 15) Veres P., et al., 2009, Icarus, 203 (2009), pp. 472-485.
- 16) Utashima M., 1999, NASDA-TMR-980003.
- 17) Dymock R., 2007, Journal of the British Astronomical Association, 117 (2007), pp. 6.
- 18) Carusi A., Valsechi G., Greenberg R., 1990, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 29 (1990), pp. 111-131.

Introduction to Hazardous NEO Detection and Impact Warning System utilizing Space-Based Telescope

Toshinori Ikenaga

Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba Ibaraki, 305-8505, Japan

This article introduces the new concept of planetary defense mission utilizing space-based telescope placed at an artificial equilibrium point. The mission concept is dedicated to detect Chelyabinsk-class small size NEOs which are hardly detected in far range. Once an impacting NEO is detected, the impacting area is estimated and an evacuation alert will be raised in the same manner as "Tsunami" warning. The NEO detection simulation is conducted using the realistic NEO distribution model i.e., Bottke model. Through some cases of numerical simulations, the required acceleration level, the required detection capability will be shown in this article.