

宇宙望遠鏡による地球接近小天体の衝突検知・警報システムについて

池永敏憲¹⁾・杉本洋平¹⁾・池田人¹⁾・吉川真¹⁾・柳沢俊史¹⁾・伊藤孝士²⁾・
吉田二美³⁾・奥村真一郎⁴⁾・石井信明¹⁾・歌島昌由¹⁾

¹⁾ 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

²⁾ 国立天文台(NAOJ)

³⁾ 千葉工業大学(Chitech)

⁴⁾ 日本スペースガード協会(JSGA)

A Study on NEO Detection and Impact Warning System utilizing Space-Telescope

Toshinori IKENAGA¹⁾, Yohei SUGIMOTO¹⁾, Hitoshi IKEDA¹⁾, Makoto YOSHIKAWA¹⁾, Toshifumi YANAGISAWA¹⁾, Takashi ITO²⁾, Fumi YOSHIDA³⁾, Shin-ichiro OKUMURA⁴⁾, Nobuaki ISHII¹⁾, and Masayoshi UTASHIMA¹⁾

Abstract

The objective of this study is to propose a space-based NEO detection and impact warning system. Two locations are assumed and compared in this study i.e., Sun-Earth Lagrange point 1 and Artificial Equilibrium Point, AEP. In the natural equilibrium points such as Lagrange points, three kinds of forces are balanced i.e., the gravitational forces by the primary and secondary bodies and centrifugal force. The AEP, on the other hand, is literary, “artificial” equilibrium point where the residual acceleration is cancelled by low-thrust. Especially on 1 au circular orbit around the Sun, the AEP can be realized by very small acceleration, which enables to place the space-telescope at an arbitrary fixed point relative to the Earth.

Key Words: NEO, Space-telescope, Planetary defense, Sun-Earth Lagrange point 1, Artificial Equilibrium Point.

1 概要

本論文では、地球接近小天体(NEO: Near Earth Object)に起因する自然災害から地球環境、文明、生命を保護することを目的とした、プラネタリディフェンスミッションの概念検討結果について記す。

小天体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もまた、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、論じることができないため、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。天体のカタログ化はNEO災害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指示している。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。このようなカタログ化の結果、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。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。

本資料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。

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	Air burst	1 MT*	1 回/200 年
50 m	Local scale	10 MT*	1 回/2,000 年
140 m	Regional scale	300 MT*	1 回/30,000 年

* MT = Mega-Ton. TNT 爆薬換算

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 仮想衝突天体群

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。

図1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。

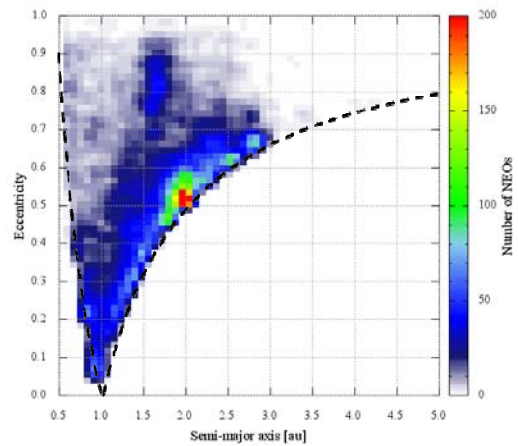


図1 a - e マップ上での仮想衝突天体群分布

図1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、次式で表される。

$$a(1-e) = 1 \text{ au or } 1 \text{ au} = a(1+e) \quad [1]$$

Bottkeモデルに基づき、 a 、 e 、及び軌道傾斜角 i が与えられると、地球衝突時の地球に対する無限遠速度ベクトルは次式で求まる。

$$\vec{V}_{\infty} = \sqrt{\frac{\mu_E}{a_E}} \begin{bmatrix} \pm \sqrt{2 - a_E/a - a(1-e^2)/a_E} \\ \sqrt{a(1-e^2)/a_E} \cos(i) - 1 \\ \pm \sqrt{a(1-e^2)/a_E} \sin(i) \end{bmatrix} \quad [2]$$

但し、式[2]はその時刻において太陽 - 地球ラインを固定した系において表現したベクトルである。図2、3にVI軌道例を示す。

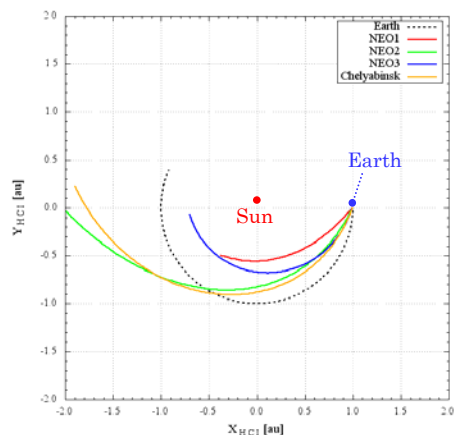


図2 VI軌道例(慣性系)

VI 軌道は太陽，地球重力を考慮した 3 体問題において生成している．軌道生成時の初期状態量は，地心から式[2]で求めた無限速度ベクトル方向に地球重力影響圏(100 万 km と設定)に達した点を初期位置，及びこの位置において地球公転速度ベクトルに無限速速度ベクトルを加えたものを初期速度として定める．その後，過去の逆伝搬することで VI 軌道を生成する．

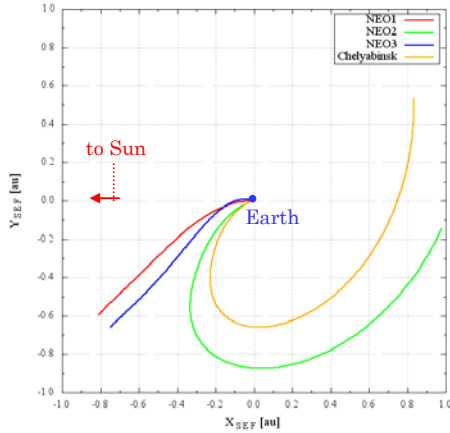


図3 VI軌道例(太陽 - 地球固定系)

図2, 3中の”Chelyabinsk”は2013年にロシア/チェリャビンスク州に落下した隕石の推定軌道要素を基に生成したものである．図3から分かる通り，チェリャビンスク隕石は夜側から昼側に移動した後，地球に衝突している．昼側から夜側に入る時点での地球からの距離は 0.6 au 程度であり，この時点では，推定直径 25 m の天体を検知することは困難であったと推測される．一方，昼側に入った後は，地上望遠鏡からの観測はほぼ不可能であったと推測される．表2に，図2, 3の凡例に対応する天体の軌道情報をまとめる．

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]

3 観測シミュレーション

本検討では，宇宙空間に設置した望遠鏡を用いて NEO を検知することを想定する．望遠鏡設置位置としては，太陽 - 地球系第 1 ラグランジュ点(SEL1 : Sun-Earth Lagrange point 1)から太陽方向を集中監視するケースと，連続加速度により維持される人工平衡点軌道(AEP : Artificial Equilibrium Point)から地球方向を集中監視する二つのケースで解析を実施，比較する．図4に模式図を記す．

SEL1 のケースでは，太陽方向を中心に半値幅 15 deg の太陽光回避角を設ける．これは 1 m 口径の望遠鏡に対して 4 m のフードを設置した状況に相当する．

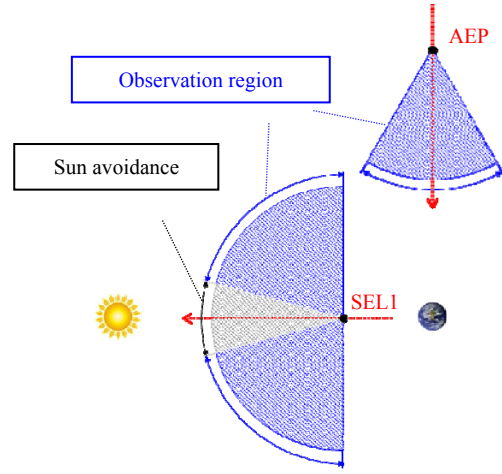


図4 観測領域模式図

検知された VI の方向は，図5で定義された方位角で出力される．

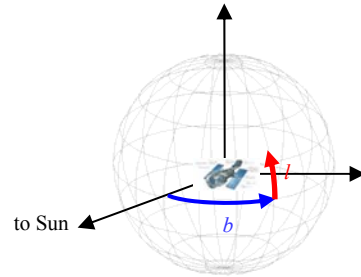


図5 VI 方位角定義

表3に，地球衝突までの猶予時間をまとめる．地球衝突が検知された場合に，避難に要する時間は，衝突地域の人口密集度，小天体の落下域の予測精度等の要因で異なるため，一概に設定することは難しい．一つの目安としては，ツングースカ事案ではおよそ 50 km 四方の木々がなぎ倒されたこと，一方で，内閣府がまとめている原子力災害時の避難推計では，30 km 圏内から約 13 万人を避難させる場合，15 時間程度で 90 % の避難を見込んでいる．本検討では，後者の推計を参考に，およそ 10 倍の時間として，1 週間前の検知を一つの目安とする．よって表3より，0.1 au 地点での検出率を評価の指標とする．

表3 衝突猶予時間

Range from Earth	Average TOF	Minimum TOF
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

3.1 SEL1 利用ケース

SEL1 からの観測ケースでは，後述する観測視野上での VI 分布を考慮し，図6に示す二種類の観測ケースで比較を行う．

Case-1 は，地球から太陽を見る方向に対して左側に視野中心をシフトさせ，半値幅 30 deg の範囲を集中的に観測する．一方，Case-2 では太陽方向を視野中心に

据えて、半値幅 15 deg の太陽光回避角以外の半球を観測する。本検討では、口径 1 m で $2 \times 2 \text{ deg}^2$ の視野を持つ望遠鏡を想定し、設定された観測領域を 1 日 1 回サーベイすると仮定する。この想定においては、1 視野当りの積分時間は Case-1 で 125 秒、Case-2 で 17 秒となる。

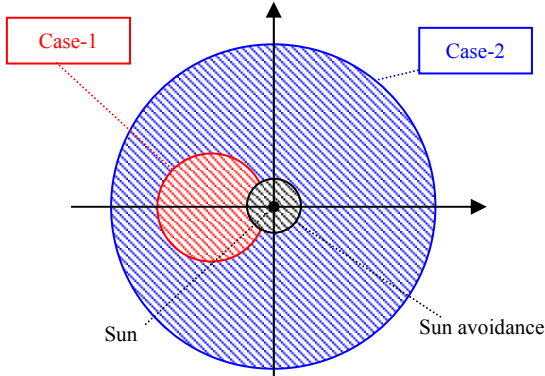


図 6 SEL1 からの太陽方向観測模式図

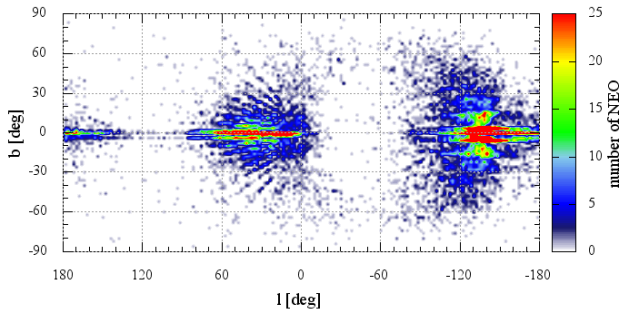


図 7 観測視野上での VI 分布(0.7 au)

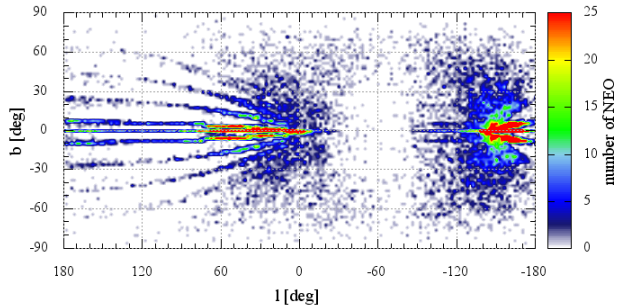


図 8 観測視野上での VI 分布(0.4 au)

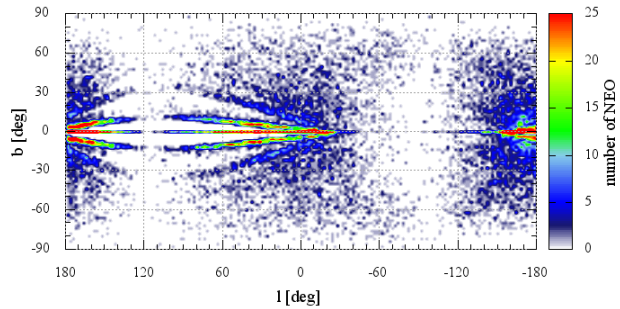


図 9 観測視野上での VI 分布(0.1 au)

図 7~9 に、望遠鏡観測視野上における、地球からの距離 0.7, 0.4, 0.1 au での VI 群の分布を示す。

図 7~9 から分かる通り、地球から離れた距離では、VI 群は太陽方向に左側に少しシフトした領域に集中し、地球に近づくにつれて右側に移動しつつ、分布が分散していく。

図 10~12 に、地球-VI 間距離に対する累積検出率の履歴を示す。ここでは、宇宙望遠鏡の検出器の性能を示す指標として、1 秒積分当りの検出等級 J_1 を導入する。 $J_1 = 20$ は保守的な値、 $J_1 = 22$ は現状の技術で達成可能なレベル、 $J_1 = 24$ は性能向上、もしくは望遠鏡の大型化により達成されるレベルである。図 10 を見ると、 $J_1 = 20$ では 50 m 以下のサイズはほとんど検出できない。140 m については、太陽側半球をカバーする Case 2 では、0.2 au まで接近した付近から、検出数が増加する。これは、接近するにつれて視等級が改善するためである。一方、比較的狭い領域を集中観測する Case 1 では、観測領域が狭い故に、その領域内にある VI 群の数が少ないため、検出数増加が頭打ちとなる。0.1 au 地点では最終的に、Case 2 の検出率が勝る結果となっている。

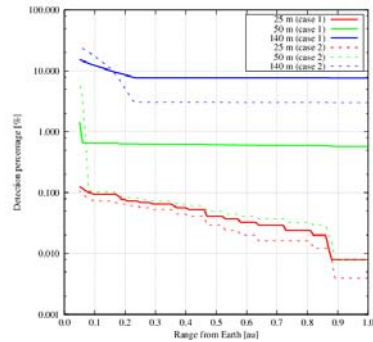


図 10 $J_1 = 20$ における累積検出率履歴

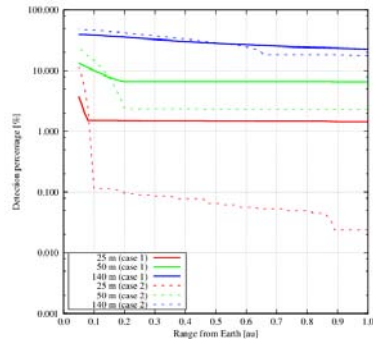


図 11 $J_1 = 22$ における累積検出率履歴

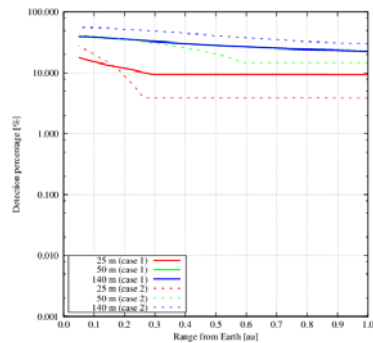


図 12 $J_1 = 24$ における累積検出率履歴

表 4 に 0.1 au 地点での検出率をまとめる。

表 4 0.1 au における検出率(SEL1 ケース)

VI size		25 m	50 m	140 m
Case-1	$J_1 = 20$	0.1%	0.7%	12.3%
	$J_1 = 22$	1.5%	10.0%	39.0%
	$J_1 = 24$	15.3%	39.0%	39.0%
Case-2	$J_1 = 20$	0.1%	0.1%	17.3%
	$J_1 = 22$	0.1%	14.7%	46.4%
	$J_1 = 24$	20.3%	40.7%	55.5%

3.2 AEP 利用ケース

AEP とは、円制限三体問題において、太陽・地球重力、及び向心力に加えて連続加速度を自身で発生させることで、太陽 - 地球固定系において人工的に静止する点の総称である。図 13 に AEP の模式図を記す。

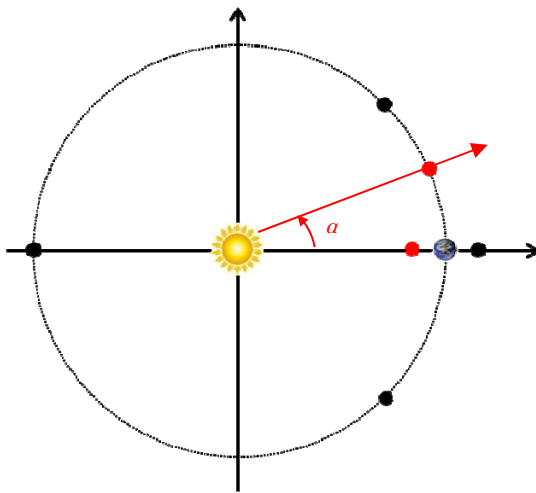


図 13 AEP 模式図

太陽を中心とした半径 1 au の円上で必要加速度が減少する。本検討では、1 au 円上の AEP を想定し、位相角 α で位置を定義する。表 5 に α と加速度の値を示す。 α が小さい、すなわち、地球に近いほど地球重力の影響で必要加速度が増大する。しかし、 $\alpha = 5 \text{ deg}$ であっても $2.33 \mu\text{m/s}^2$ であり、JAXA のソーラーセイル実証機 IKAROS の発生加速度と同等に収まる。

表 5 AEP 保持加速度

α [deg]	加速度 [$\mu\text{m/s}^2$]
5	2.33
10	0.58
15	0.26
20	0.14

AEP からの観測ケースでは、AEP から地球を視野中心に据えて、SEL1 ケースの Case-1 と同様に半値幅 30 deg の領域を観測する。図 14~16 に、 $\alpha = 5, 9, 13 \text{ deg}$ の AEP から見た、地球から 0.1 au 地点における VI 群の観測視野マップ上での分布を記す。図 14~16 から分かる通り、 α が増大、すなわち地球から離れるほど、見かけの VI 群分布が小さくなるため、 $\alpha = 9 \text{ deg}$ 程度離れると、ほぼ全ての VI 群をその視野に収めることができる。但し、地球から離れるほど、視等級の観点では不利となる。

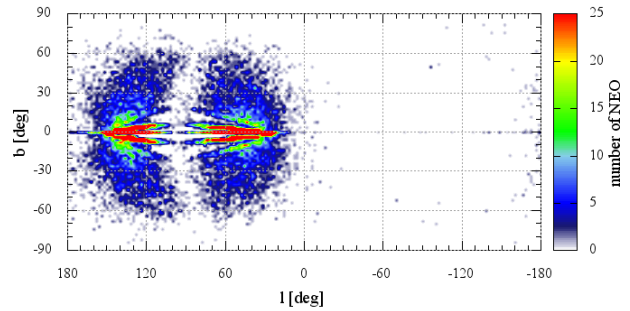


図 14 0.1 au VI 群分布 : $\alpha = 5 \text{ deg}$

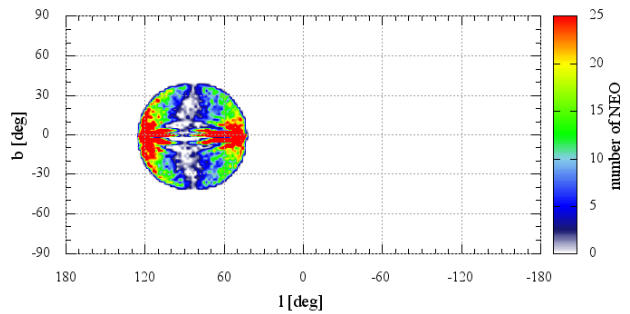


図 15 0.1 au VI 群分布 : $\alpha = 9 \text{ deg}$

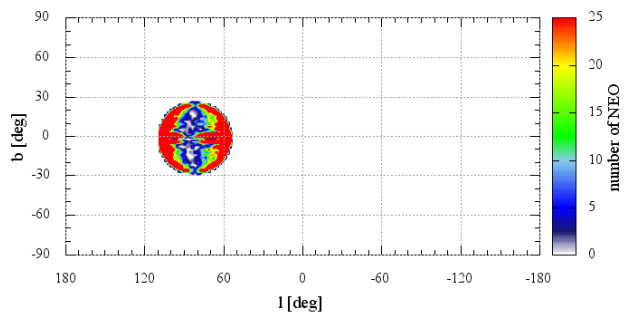


図 16 0.1 au VI 群分布 : $\alpha = 13 \text{ deg}$

表 6 に、検出率をまとめる。AEP のケースでは、 $J_1 = 22$ で 50 m 天体の約 60%、 $J_1 = 24$ ならば 25 m 天体もほぼ 100%検出できる結果となった。

表 6 0.1 au における検出率(AEP ケース)

VI size		25 m	50 m	140 m
$\alpha = 9 \text{ deg}$	$J_1 = 20$	0.4%	0.5%	46.0%
	$J_1 = 22$	6.1%	35.9%	50.6%
	$J_1 = 24$	47.8%	50.6%	50.7%
$\alpha = 13 \text{ deg}$	$J_1 = 20$	0.3%	1.5%	81.3%
	$J_1 = 22$	5.4%	61.6%	99.9%
	$J_1 = 24$	99.8%	99.8%	99.9%

4 結論

本原稿では、宇宙望遠鏡を用いた、新しい概念の地球接近小天体の検知・警報ミッションコンセプトについてまとめた。本コンセプトでは、事前のカタログ化が難しい小サイズの小天体の接近を検知し、落下予想地域に避難警報を発出することで、小天体に起因する災害の防止を目的としている。数値解析の結果、人工平衡点を利用することで、小天体の地球衝突前の検出

率を大きく改善できることが分かった。しかしながら、実際に人工平衡点から地球を視野中心に据えて観測する場合、地球が発する反射光の影響を考慮する必要がある。1 au 離れた L5 点から見た場合でも、地球の等級は-1.8 等級とあり、AEP から見た場合の地球はさらに明るくなることが予想されるため、何らかの対策が必要になると考えられる。また、今回の検討では可視望遠鏡の使用を想定したが、海外の NEO 観測ミッションでは赤外望遠鏡が多用されている。NEO からの反射光は、赤外のある波長領域に集中しているというデータもあり、可視望遠鏡よりも検出率を改善できる可能性がある。今後の検討項目としたい。

謝辞

最後に、2014 年、及び 2015 年にインターンシップとして本検討に参加した Alessandro Takeshi Morita Gagliardi 氏、Martin Jocqueviel 氏は、わずか 2 か月間という短い期間にも関わらず、大きな貢献を果たした。この場を借りて御礼申し上げたい。

参考文献

- 1) Mainzer, A., et al., “NEOWISE Observations of Near-Earth Objects: Preliminary Results”, *The Astrophysical Journal*, 743:156(17pp), 2011.
- 2) Harris, A., “NEA Populations and Impact Frequency”, Asteroid Grand Challenge Seminar Series, 2014.
- 3) National Research Council of the National Academies, “Defending Planet Earth: Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies Final Report”, The National Academies Press, 2010.
- 4) Camasho, S., “Introduction to IAWN and UNCOUOS UN Recommendations for an International Response to the NEO Impact Threat”, Minor Planet Center Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics Cambridge, MA, 13 – 14 January, 2014.
- 5) Sugimoto, Y., “Hazardous Asteroids Mitigation: Campaign Planning and Credibility Analysis”, Ph. D. dissertation, University of Glasgow, 2014.
- 6) 山口皓平, 山川宏, “推力スイッチングによる帯電セイル宇宙機の軌道制御に関する研究”, 日本航空宇宙学会, 航空宇宙技術, Vol. 12, pp. 79-88, 2013.
- 7) Emel’yanenko, V. V., et al., “Astronomical and Physical Aspects of the Chelyabinsk Event (February 15, 2013)”, *Solar System Research*, Vol. 47, No. 4, pp. 240-254, 2013.
- 8) Zuluaga, J. I., Ferrin, I., “A Preliminary Reconstruction of the Orbit of the Chelyabinsk Meteoroid”, Cornell University Library, 2013.
- 9) Bottke Jr, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J. M., Levison, H. F., Michel, P., and Metcalfe, T. S., “Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects”, *Icarus* 156, 399-433, 2002.
- 10) Ikenaga, T., Gagliardi, A. T. M., Ikeda, H., Sugimoto, Y., Utashima, M., Ishii, N., and Yoshikawa, M., “Mission Design for NEO Detection and Impact Warning System”, *Transaction of the Japan Society of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 59, No. 4, pp. 243-250, 2016.
- 11) 歌島昌由, “宇宙及び宇宙望遠鏡によるNEO検出シミュレーション”, NASDA-TMR-980003, 1999.
- 12) Dymock, R., “The H and G Magnitude System for Asteroids”, *The BAA Observers’ Workshops*, J. Br. Astron. Assoc. 117, 6, 2007.
- 13) WISH推進チーム, “超広視野初期宇宙探査衛星 WISH”, JAXA宇宙科学研究本部 理学委員会 衛星ワーキンググループ提案書, 2008.
- 14) 内閣府(原子力防災担当), “原子力災害を想定した避難時間推計 基本的な考え方と手順ガイド”, 2016.
- 15) Ikenaga, T., Jocqueviel, M., Sugimoto, Y., Ikeda, H., Gagliardi, A. T. M., Yoshikawa, M., Utashima, M., and Ishii, N., “Study on NEO Impact and Warning System utilizing Artificial Equilibrium Point Orbit”, 67th International Astronautical Congress, IAC-16-A3.IP.1.x34377, 2016.
- 16) Morimoto, M., Yamakawa, H., “Periodic Orbits with Low-Thrust Propulsion in the Restricted Three-Body Problem”, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 29, No. 5, September–October, 2006.
- 17) Gagliardi, A. T. M., “Mission Design for NEO Detection and Impact Warning System Final Report”, Summer Internship at JAXA, 2014.
- 18) Jocqueviel, M., “Orbital Analysis for Artificial Equilibrium Point Orbits in the Circular Restricted Three-Body Problem”, Summer Internship at JAXA, 2015.
- 19) Ceriotti, M., McInnes, C., “A Near Term Pole-Sitter using Hybrid Solar Sail Propulsion”, 2nd International Symposium on Solar Sailing, ISSS 2010, 20-22 July 2010.
- 20) Ceriotti, M., McInnes, C., “Hybrid Solar Sail and Solar Electric Propulsion for Novel Earth Observation Missions”, *Acta Astronautica*. 69 (2011) 809-821, 2011.
- 21) 歌島昌由, “L5点から見た地球の観測等級”, NASDA先端ミッション研究センター資料, GAA-99019, 1999.

(2017年5月8日受付, 2017年5月10日受理)