

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15210

研究課題名（和文）高い信頼性を実現する地球衝突小惑星の軌道変更ミッション最適設計システムの開発

研究課題名（英文）Development of High Reliable Optimization System for Asteroid Deflection Missions

研究代表者

山口 皓平（Yamaguchi, Kohei）

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：30808613

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：地球に衝突する恐れのある小天体の軌道を予め変更し、衝突を回避する手法について検討した。小天体衝突機を用いる手法においては、衝突時の速度ベクトルの幾何的な関係解析により、衝突速度の大きさを小さく保った上で軌道変更距離を増大する衝突軌道設計手法を実現した。また大質量宇宙機を天体近傍に停留させ、間に働く万有引力で長時間牽引し軌道変更する手法では、人工ハロー軌道に宇宙機を投入する手法を検討した。ハロー軌道の形状を定義するパラメータを変数を持つ運動方程式の導出に加え、複数ハロー軌道間の遷移制御則を提案した。これより、小天体の公転位置に応じたハロー軌道の選択が可能となり、効果的な軌道変更が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天体の衝突災害は地球規模の問題であり、研究の社会的意義は非常に大きい。衝突機の速度ベクトルの幾何関係が定義する impact-geometry の増大を行う軌道設計手法は独自のものであり、学術的に重要である。得られた成果である速度の大きさの抑制と軌道変更距離の増大の両立は、ミッション全体の成功率を改善するものであり、意義は大きい。重力トラクタにおいて導いた運動方程式は人工ハロー軌道にある宇宙機制御に特化したものである。ハロー軌道の維持、ハロー軌道間の遷移という2つの制御則の有効性を架空の牽引ミッションを通して示されており、小天体の軌道変更の研究分野に対するインパクトは十分である。

研究成果の概要（英文）：Methods to deflect Earth-threatening asteroids from Earth collision routes were investigated. For a kinetic impactor that impacts the asteroid with hypervelocity, a trajectory optimization method that effectively increases the impact-geometry was proposed. The impact-geometry is defined by the velocity vectors at the impact and the achievable deflection distance is proportional to the impact-geometry. The proposed method can increase the deflection distance without increasing the impact speed.

For the gravity tractor which tows the asteroid by using the gravitational interaction between the asteroid and spacecraft, putting the spacecraft into an artificial halo orbit (AHO) was proposed. Since a spacecraft in an AHO moves circularly in a plane that is perpendicular to the towing direction of the asteroid, multiple spacecraft can be used for towing. Equations of motion and laws to control the spacecraft in AHOs were proposed. The effectiveness of the proposed law was numerically shown.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：near-Earth asteroid trajectory optimization kinetic impactor gravity tractor asteroid deflection artificial halo orbit

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球接近小天体 (Near-Earth Asteroid: NEA) の発見数は年々増加し、研究を開始した 2019 年時点で 3 万個に迫る勢いであった。もっとも有名な恐竜絶滅を引き起こした小天体衝突のみならず、2000 平方キロメートルの森林をなぎ倒した 1908 年のツングースカ小天体、1500 人程度の怪我人を出した 2013 年のチェリャビンスク小天体など、地球と小天体の衝突による被害は度々報告されている。このような衝突による災害を未然に防止する手法がこれまでに数多く考案され、研究されてきた。特に有望なものの一つが、小天体に高速で宇宙機を衝突させる手法 (Kinetic Impactor: KI) である。衝突によって小天体を本来の軌道から逸らせることで、地球衝突を回避することが可能とされる。また、比較的大きな質量の宇宙機を小天体の近傍に停留させ、宇宙機と小天体の間に働く万有引力で長時間かけて軌道を変更する重力トラクタ (Gravity Tractor: GT) も効果的であるとされる。

天体の衝突問題に対する関心は高まる傾向にある。国際的な取り組みを例に挙げると、小天体の発見及び危険の発信に取り組む IAWN、衝突回避手法の研究に取り組む SMPAG という 2 つの組織が 2013 年の国連総会において承認され、活発に活動している。また、天体の衝突問題を専門的に議論する国際会議である Planetary Defense Conference (PDC) も隔年での開催が続いており、同分野に関する積極的な研究が行われている。また最も注目すべき取り組みとして、Double Asteroid Redirection Test (DART) が挙げられる。これは、実際的小天体に宇宙機を衝突させる実証実験であり、2022 年に実施予定であった (現在は実施済み)。このような天体の衝突問題に対する意識の向上は日本国内でも見られる。2017 年には PDC の東京開催が実現し、2018 年度開催の宇宙科学技術連合講演会では、天体の衝突問題を議論するオーガナイズドセッションが開催された。特に、小天体の発見監視に関する研究が積極的になされている点が、国内における同分野の研究動向の特徴である。

国内における小天体の衝突問題への関心が高まりつつあり、その研究内容は新たな小天体の発見・監視に集中する傾向が見られる。一方で、危険な天体が発見された後に軌道を変更し地球衝突を回避する手法の研究の数は十分といえる状況にない。小天体の地球衝突は、発生の頻度こそ小さいものの大規模な災害の発生につながる極めて重要な問題であることから、研究の活発化と国際的な貢献が非常に重要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、地球に衝突する可能性の高い小天体が発見された場合に備え、その軌道をあらかじめ変更し、地球衝突を回避する手法を提案・検証することである。軌道変更手法としては、KI と GT を対象とした。

KI については、従来よりも軌道変更効果の高い衝突軌道設計手法を確立することを目標とした。KI ミッションにおいては、小天体に対する衝突相対速度が重要なパラメータとなるものの、速度の増大は誘導制御の難易度の上昇、ひいてはミッション全体の成功率の低下につながる。よって、衝突機の衝突速度の大きさを低下させ、達成する軌道変更距離を増大する軌道の設計手法の確立を目標とした。また、宇宙環境由来の自然力を利用した推進システムによる高効率推進の KI への有用性についても検討する。

GT については、人工ハロー軌道と呼ばれる特殊な軌道を用いる手法の確立を目的とした。従来の GT ミッションにおいては、天体の牽引方向を表すベクトル上の一点に一機の大質量宇宙機を静止させ、牽引を行うことが提案された。一方、人工ハロー軌道とは、小天体を牽引する方向のベクトルと垂直に交わる平面上に存在する円軌道であり、一つの軌道に複数の宇宙機を投入することによる牽引力の増大などのメリットが得られる。しかし、人工ハロー軌道に投入された宇宙機は、推進力によって作られた人工的な平衡点の周りを周回する複雑な運動を行うことになる。本研究では、人工ハロー軌道にある宇宙機の運動を定式化するとともに、その制御手法の提案とミッションに与える影響を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究は、数値シミュレーションベースで行なった。

KI の研究については、申請者独自の成果である impact-geometry map (IGM) を応用することによる最適軌道設計手法の構築を試みた。Impact-geometry とは、小天体の速度ベクトルと衝突機の相対速度ベクトルの内積であり、小天体に対する宇宙機の衝突時の速度ベクトルの幾何的な関係のみから決定される量である。また、衝突によって引き起こされる小天体の地球接近距離の変化は、impact-geometry の値に比例する性質を持つ。先の IGM とは、衝突機を投入する軌道ごとに達成され得る impact-geometry の最適値 (絶対値が最大となる値) を計算・可視化したものである。IGM により、設計した KI ミッションで達成し得る impact-geometry の最適値が解析可能となる。本研究では、IGM で得られる impact-geometry を太陽に対する宇宙機の位置で微分し、impact-geometry の値の瞬時変化を最大化する局所的最適制御則を求めた。また、得られた軌道を初期値として数値的に最適化するスキームを確立し、最適衝突軌道の設計手法を構築した。加えて、公開されている実際の NEA リストから作成した架空の地球衝突天体に対して提案手法を

適用し、その効果を確認した。また、宇宙環境力を KI に用いることの検討については、太陽風を利用して推力を得る帯電セイルを用いる可能性を検証した。帯電セイルは、宇宙機本体の回転運動によって展開した高電位の導電性テザーで太陽から吹き出す高速のプラズマ流である太陽風を受け止めるシステムであり、燃料を用いない高効率推進が KI のための軌道設計に効果的である可能性がある。一方で、帯電セイルは最大 20 km 程度のテザーの使用が想定される大規模システムであり、本体の回転や太陽風動圧によって変形するテザーの形状を考慮した推力モデルの考案が必須である。本研究では、テザーを微小要素に離散化し、それぞれが受ける太陽風動圧の計算式を導出した。また、得られた微小要素の式を用いてテザー全体の形状を決定するとともに、宇宙機全体が発生させる推力のモデルを確立した。さらに、確立した推力モデルを用いた軌道計算ツールを作成し、帯電セイルによる軌道制御によって小天体までの到達軌道の設計を試みた。

GT についてはまず、人工ハロー軌道における宇宙機制御に適した運動方程式の導出を行なった。小天体と宇宙機の運動は、小天体の初期軌道に固定され、その公転運動とともに移動する回転座標系において定式化する。GT では万有引力を用いることから、小天体と宇宙機間の距離がミッションにおける重要なパラメータとなる。そこで、回転系において天体と宇宙機を重力テザーで接続された一つの物体に見立て、テザーの長さ  $l$  と物体の姿勢角を表す 2 つの角度を変数とした運動方程式を導出した。また、得られた運動方程式をもとに人工ハロー軌道を維持するための制御則を提案した。さらに、異なるサイズの人工ハロー軌道間を遷移する手法も提案し、ミッション中に適切なタイミングで軌道間遷移を行うことによる万有引力の変更と牽引効果の増大、さらに消費燃料の削減によるミッション期間の延長効果を狙った。以上の提案を数値シミュレーションで検証し、変数変換の効果、制御則の有効性、最終的な軌道変更距離の増大と消費燃料の削減効果を確認した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 小天体に対する衝突軌道の最適設計手法構築

先に述べた IGM を応用し、宇宙機の衝突軌道の最適設計手法を構築した。図 1 は、提案手法によって得られた軌道の例を IGM 上にプロットしたものである。ただし、宇宙機は質量 1000 kg であり、40 mN の推力を用いることのできるイオンエンジンの搭載を仮定している。IGM は横軸が宇宙機を投入する軌道の長半径、縦軸が離心率であり、背景のカラーマップが impact-geometry を表す。提案した局所最適制御則で得られた軌道が黒波線であり、本制御則を用いることで impact-geometry の絶対値が単調に増加することが確認できた。また、局所最適軌道をもとに数値的な最適化を行って得られた軌道が赤実線であり、こちらも同じく impact-geometry の絶対値を効果的に増大させながら、小天体への衝突を達成する軌道が得られた。図 2 は、数値的に最適化して得られた衝突軌道を、太陽周りの軌道として 2 次元表示したものである。

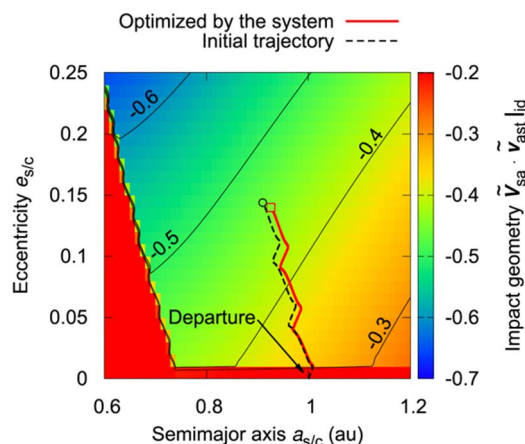


図 2 IGM 上の宇宙機軌道の遷移 (黒破線：局所最適軌道，赤実線：数値最適化後の軌道)

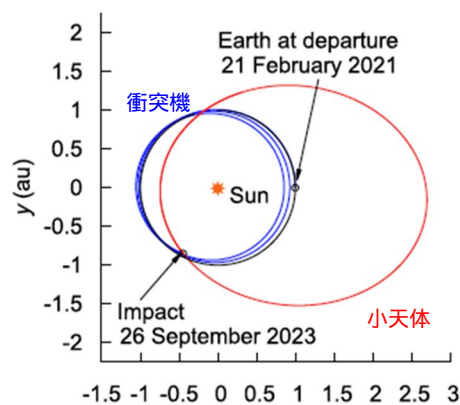


図 1 小天体への最適衝突軌道の例

架空小天体に対する検討を通して本手法が示した重要な性質の一つに、軌道変更距離の増大と衝突相対速度の低下が挙げられる。衝突相対速度ではなく impact-geometry の値を直接増大させる本研究のアプローチにより、衝突速度を低下させても軌道変更距離が増大する衝突軌道の設計が可能となった。この成果は、米国航空宇宙学会の Journal of Guidance, Control, and Dynamics 誌に掲載された。

さらに、IGM を応用した軌道変更手法を、インパルス的な加速と弾道飛行の組み合わせで飛行する宇宙機にも適用可能な形に拡張した。先に示したイオンエンジンは、比較的弱い推力を長時間生じさせることによって軌道を制御する。これに対してインパルス的な手法は、比推力(消費)が小さいながらも瞬間的に大きな力を用いる手法であり、これまでに数多く用いられてきた実績がある。本検討により、IGM を用いた軌道設計手法の適用範囲をさらに拡大することに成功した。本成果は、Acta Astronautica 誌に掲載された。

(2) 帯電セイル宇宙機の推力モデル提案と小天体への到達軌道設計

テザーモデルの離散化と太陽風動圧の計算式の定式化により、宇宙機本体に生じる太陽風の力の計算が可能となった。また、宇宙機全体が発生させる推力を太陽風に対する宇宙機の姿勢の関数として定式化した。さらに、(1)の軌道最適化手法を応用した軌道設計により、帯電セイルによる小天体への到達が可能であることを示した。図3は、Ryuguを対象とした軌道設計の例である。本成果は、Acta Astronautica誌に掲載された。

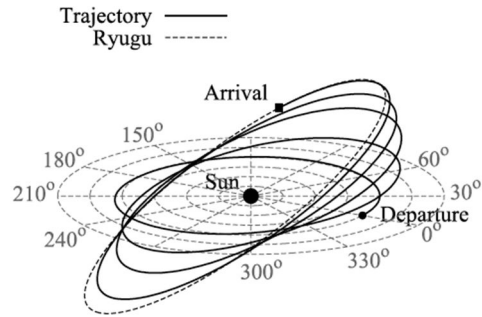


図3 帯電セイルによる小天体 Ryugu への到達軌道

(3) 人工ハロー軌道を用いた GT のダイナミクス  
の定式化と軌道制御手則の提案、数値シミュレーションによる効果の確認

小天体と宇宙機を重力テザーで接続された一つのシステムとしてみなすことで、重力テザーの長さ  $l$  とシステムの 2 つの姿勢角を変数とする運動方程式を導出した。この方程式においては、人工ハロー軌道の形状を決定するパラメータとその時間微分が直接運動方程式の変数となることから、人工ハロー軌道における運動の記述や軌道制御則の導出が容易となった。また、得られた運動方程式を元に、人工ハロー軌道を維持する軌道制御則、複数の人工ハロー軌道間を遷移する制御則を提案した。さらに、提案した制御則を用いたミッションの有効性を、数値シミュレーションによって確認した。ただし、提案した運動方程式は制御則の導出のみに用い、運動の計算は回転座標系における変換前の非線形運動方程式を数値積分することで行った。図4は、架空小天体を GT により牽引するミッションのシミュレーション結果である。図4左は、回転座標系において本来原点に静止し続けるはずの小天体が、GT の牽引によって軌道変更されていることを示している。また、提案した軌道間の遷移則により、小天体の公転位置に応じて宇宙機が運動する人工ハロー軌道を切り替え、小天体に与えるエネルギー変化を効果的に増大させることに成功した(図4, 右)。なお、提案手法によって軌道変更の距離も増大することを確認した。本成果は、Acta Astronautica誌に掲載された。

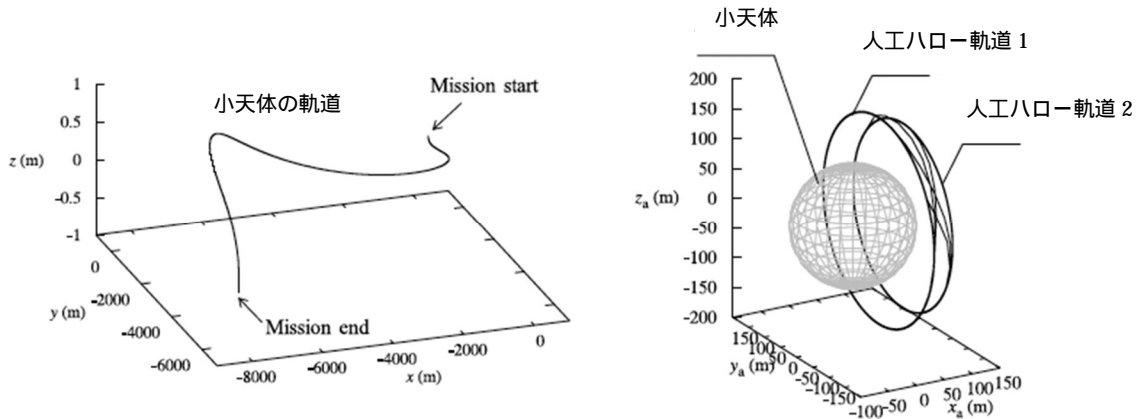


図4 GTによる小天体の牽引ミッション(左), ミッション中の人工ハロー軌道間遷移(右)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamaguchi Kohei, Gu Xinbo, Inamori Takaya, Kimura Kahaku, Sakurai Yuto	4. 巻 181
2. 論文標題 Study on ballistic kinetic impactor mission design and evaluation using impact-geometry maps	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 336 ~ 351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2021.01.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamaguchi Kohei, Hayama Ryo, Miyata Kikuko, Hara Susumu	4. 巻 43
2. 論文標題 Highly Effective Kinetic Impact Design for Asteroid Deflection Missions Exploiting Impact-Geometry Maps	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Guidance, Control, and Dynamics	6. 最初と最後の頁 1082 ~ 1098
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.G004867	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamaguchi Kohei, Miyata Kikuko	4. 巻 166
2. 論文標題 Orbital maneuvering of electric solar wind sail based on an advanced solar wind force model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 417 ~ 430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2019.10.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamaguchi Kohei, Park Ji Hyun, Gu Xinbo, Inamori Takaya	4. 巻 198
2. 論文標題 Orbital dynamics of gravity tractor spacecraft employing artificial halo orbit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 376 ~ 387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2022.06.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 K. Yamaguchi, Ji Hyn, Park, X. Gu, T. Inamori
2. 発表標題 On Orbital Dynamics of Gravity Tractor Spacecraft Exploiting Artificial Halo Orbit
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口皓平, Gu Xinbo, 木村佳伯, 稲守孝哉
2. 発表標題 Impact-Geometry Mapを応用した小惑星衝突機の軌道設計手法に関する研究
3. 学会等名 第65回 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村佳伯, 山口皓平, 稲守孝也, Gu Xinbo
2. 発表標題 Kinetic Impactorの効果増大のためのスラストタイミング最適化
3. 学会等名 第65回 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 顧新博, 山口皓平, 稲守孝哉 名古屋大学
2. 発表標題 A Trajectory Optimization Method of Kinetic Impactor for Asteroid Deflection Exploiting Impact-Geometry Map
3. 学会等名 第65回 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口皓平
2. 発表標題 Impact-Geometry Mapを利用した 小惑星衝突機の軌道設計に関する研究
3. 学会等名 プラネタリーディフェンス・シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yamaguchi, X. Gu, T. Inamori, K. Miyata
2. 発表標題 Effective Trajectory Optimization Method for Kinetic Impactor for Asteroid Deflection Missions
3. 学会等名 71st International Astronautical Congress, Cyberspace Edition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 顧 新博, 山口 皓平, 稲守 孝哉
2. 発表標題 Trajectory Design Method of Spacecraft as a Kinetic Impactor for Asteroid Deflection Exploiting Impact-Geometry Maps
3. 学会等名 第64回 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yamaguchi Kohei, Hayama Ryo, Miyata Kikuko, Hara Susumu
2. 発表標題 Impact-Geometry Maps; Visualization of Kinetic Impact Effectiveness for Asteroid Deflection Missions
3. 学会等名 SciTech 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口皓平, 羽山諒, 宮田喜久子, 原進
2. 発表標題 Impact Geometry Mapの応用によるKinetic Impactorの高效率衝突軌道設計手法に関する研究
3. 学会等名 第63回 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamaguchi Kohei, Miyata Kikuko, Inamori Takaya
2. 発表標題 Effective Trajectory Optimization Method for Kinetic Impactor for Asteroid Deflection Missions
3. 学会等名 71st INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL CONGRESS (IAC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口皓平, Gu Xinbo, 稲守孝哉, 田口真也
2. 発表標題 Impact-Geometry解析に基づく小惑星衝突機の最適軌道設計手法の提案
3. 学会等名 第66回 宇宙科学技術連合講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口皓平
2. 発表標題 小天体の軌道形状がImpact-Geometry Mapを用いた衝突機の軌道設計手法の効果に与える影響
3. 学会等名 2022年度 プラネタリーディフェンス・シンポジウム (第14回スペースガード研究会)
4. 発表年 2023年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------