

特集「宇宙防災:科学と工学の新たな展開」 二重小惑星探査計画Heraに向けた 小惑星熱物理モデルの開発

金丸 仁明¹, 岡田 達明², 坂谷 尚哉², 鳶生 有理², 田中 智², 石崎 拓也²,
千秋 博紀³, 荒井 武彦⁴, 関口 朋彦⁵, 出村 裕英⁶, 平田 成⁶, 神山 徹⁷

2024年6月7日受領, 査読を経て2024年7月30日受理

(要旨) 小惑星の表面温度は, 探査機による近傍運用の計画立案や観測データの解釈を行う上で基礎的な情報である. 近年では小惑星探査機に搭載された熱赤外カメラによる小惑星の熱撮像が行われるようになった. 熱観測のデータから小惑星の熱物性を決定するためには, 合わせて数値シミュレーションによる温度の推定を行う必要がある. 二重小惑星探査計画Heraに向けた熱物理モデルの開発の状況と期待される科学成果について紹介する.

1. はじめに

1.1 小惑星の熱物理モデル

熱物理モデリング(TPM)は, 小惑星表面の温度分布を求めるための数値シミュレーションであり, 小惑星探査の理学および工学の両面において重要な役割を果たしている. 歴史的には, disk-integratedな熱モデル(thermal model)とdisk-resolvedな熱物理モデル(thermophysical model)として発展してきた. 近年では, 小惑星探査によって得られるようになった詳細な3次元形状モデル(三角形のメッシュで分割されたものが主流)をもとに熱物理シミュレーションが行われるようになってきた. 熱物理シミュレーションによって小惑星の表面温度を知ることが, 理学・工学の両側面において重要である. 以下に, その活用例を挙げる.

天体表面の温度環境を知っておくことは, 小惑星

の近傍運用や着陸運用を行う上で重要である. 小惑星からの熱放射によって生じる圧力は, 小惑星近傍における探査機や放出物の運動に摂動を与えることもある[1]. 小惑星表層の温度変化は, 揮発性物質の分布や物質放出のメカニズムを考える上でも重要である. 小惑星Bennuから粒子が放出されている様子が見つかっており, 熱応力による岩塊の破壊は原因の一つとして考えられている[2].

また, 赤外分光計や熱カメラのデータを解釈するためには, 熱物理シミュレーションと比較する必要がある. はやぶさ2ミッションでは, 小惑星の中間赤外画像から表層物質の熱物性(熱慣性, 放射率, 表面凹凸の度合い)を推定した[3-5]. 近赤外分光においても, 3 μm 帯の吸収を見るためには, 黒体放射によるバイアス“thermal tail”を取り除く必要があり, 観測点の温度は重要な情報である[6].

さらに, 熱物理モデルにもとづいて小惑星に働く非重力加速度を推定することができる. 熱放射の異方性によって生じる軌道進化や自転進化は, それぞれYarkovsky効果, YORP効果として知られている[7, 8]. こうした非重力効果による軌道進化は, 地球に接近する小惑星の軌道を予測する上でも無視できない効果であり, プラネタリー・ディフェンスにおいても重要なテーマである[9, 10].

1.東京大学

2.ISAS/JAXA

3.千葉工業大学

4.前橋工科大学

5.北海道教育大学

6.会津大学

7.産業技術総合研究所

kanamaru@eps.s.u-tokyo.ac.jp

1.2 Heraミッションと小惑星熱撮像

Heraミッションでは、日本が開発する熱赤外カメラ(thermal infrared imager; TIRI)によって二重小惑星の熱撮像が予定されている[11]。目標天体の小惑星(65803) Didymosは、Dimorphosと呼ばれる衛星をもつ二重小惑星である。蝕による急激な温度低下が起こるなど、二重小惑星に特有の熱環境が予想される。我々は、二重小惑星に適用可能な熱物理モデルを開発しつつ、TIRIの運用に向けて準備を進めている。また、二重小惑星の熱物理シミュレーションを用いて、二重小惑星の力学進化にも迫る。

2. 二重小惑星の熱物理モデル

2.1 コード開発の概要

我々は、小惑星の力学シミュレータAstroshaper¹を開発してきた。Astroshaperは、Julia言語で実装されたパッケージ群である。それらのうち、AsteroidThermoPhysicalModels.jl²が熱物理シミュレーションの機能を提供する。ここで、.jlはJulia言語で書かれたファイルにつける拡張子である。多くのJulia言語のパッケージに倣い、GitHubにてオープンソース(MITライセンス)で開発を進めており、誰でも利用できる。熱物理シミュレーションを動かすためのサンプルコードもAstroshaper-examples³にて公開している。開発に伴ってソースコードが変更されると、継続的インテグレーション(continuous integration; CI)と呼ばれる手法にもとづいて、自動でテストが行われる。こうしてmacOS, Windows, Ubuntuといった主要なOSで動作確認を済ませてから提供している。

AsteroidThermoPhysicalModels.jlは、入力された小惑星の3次元形状モデル・熱物性値・天体暦(e.g., 太陽の位置, 小惑星の軌道や自転などの情報)にもとづいて、天体表層の温度分布と非重力効果を計算する(図1)。小惑星の形状モデルとして三角

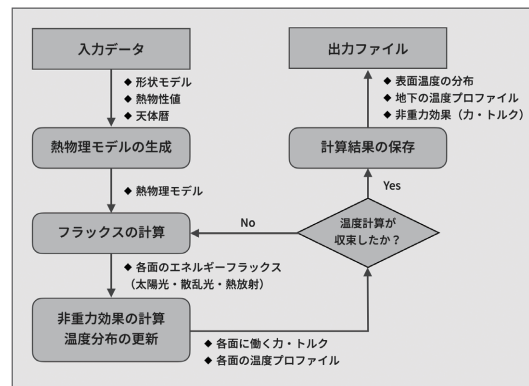


図1: 熱物理シミュレーションの手順。

形のメッシュで分割された多面体モデルを用いており、現在はWavefront OBJ形式のみ入力に対応している。小惑星の表面温度を計算するために必要となる標準的な熱物理プロセスを考慮してある。

さらに、AsteroidThermoPhysicalModels.jlに実装した熱物理モデルを、二重小惑星に適用できるように拡張した。この計算ライブラリは、小惑星RyuguのYORP効果を計算するためのコードが元になっている[12]。単独の小惑星を扱う場合とはほぼ同じユーザーインターフェースで、二重小惑星の主星と衛星に対して同時に熱物理シミュレーションが行える。次節以降では、本ライブラリが取り扱う計算モデルについて説明していく。本稿で使用する記号は表1にまとめた。

2.2 温度分布の計算

我々の熱物理モデルでは、小惑星の形状モデルの面素ごとに深さ方向1次元の熱伝導方程式を解く。現在のバージョンでは、場所によって(面素ごとに)異なる熱伝導率を与えることはできるが、深さや温度によらず一定の値としている。天体内部に熱源のない小惑星表層では、熱伝導方程式は以下のように書ける。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

小惑星表面では、面素への入射光・地中への熱伝導・熱放射が釣り合うことから上面の境界条件が得られる(図2)。

¹Astroshaper – <https://github.com/Astroshaper>

²AsteroidThermoPhysicalModels.jl – <https://github.com/Astroshaper/AsteroidThermoPhysicalModels.jl>

³Astroshaper-examples – <https://github.com/Astroshaper/Astroshaper-examples>

表1: 記号一覧(アルファベット順).

A	熱放射によって小惑星に働く加速度 [m/s^2]
a	軌道長半径 [m]
C_p	定圧熱容量 [J/kg/K]
c_0	真空中の高速 [m/s]
dF	面素に働く力 [N]
E	面素が放出するエネルギー [W/m^2]
e	軌道離心率 [-]
F	熱放射によって小惑星に働く力 [N]
F_{abs}	面素が吸収する合計のエネルギー [W/m^2]
F_{rad}	周りの面素から届く熱放射のフラックス [W/m^2]
F_{scat}	周りの面素から届く散乱光のフラックス [W/m^2]
F_{sun}	太陽から直接届くエネルギーフラックス [W/m^2]
$f_{i \rightarrow j}$	2つの面素間の形態係数 (view factor) [-]
f_{YS}	Yarkovsky-Schach 効果の大きさを表す係数 [-]
k	熱伝導率 [W/m/K]
m	質量 [kg]
$\hat{n}$	面素の法線ベクトル
n	軌道平均運動 [rad/s]
$\mathbf{r}$	位置ベクトル [m]
r	半径あるいは距離 [m]
R_{vis}	可視光における反射率 [-]
$R_{\text{i.r.}}$	熱赤外における反射率 [-]
S	面素の面積 [m^2]
T	温度 [K]
t	時間 [s]
z	深さ [m]
Γ	熱慣性 [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-0.5}$ (tiu)]
ε	放射率 [-]
θ	面素の傾き [rad]
ν	真近点角 (true anomaly) [rad]
ρ	密度 [kg/m^3]
σ	シュテファン=ボルツマン定数 [$\text{W/m}^2/\text{K}^4$]
τ	熱放射によって小惑星に働くトルク [$\text{N} \cdot \text{m}$]
下付き文字:	
1	二重小惑星の主星
2	二重小惑星の衛星
h	太陽中心 (heliocentric)
i	形状モデルの面素のインデックス
j	面素 i から見える面素のインデックス
N	小惑星の軌道面に垂直な成分 (normal)
R	太陽から小惑星に向かう動径方向の成分 (radial)
T	動径方向に垂直で軌道面内にある成分 (transpose)

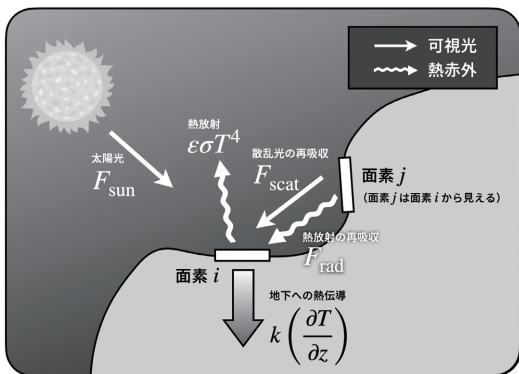


図2: 小惑星表面におけるエネルギーバランス.

$$F_{\text{abs}} + k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = \epsilon\sigma T_{z=0}^4 \quad (2)$$

ここで F_{abs} は、ある時刻にその面素が吸収するエネルギーの合計である.

$$F_{\text{abs}} = (1 - R_{\text{vis}})F_{\text{sun}} + (1 - R_{\text{vis}})F_{\text{scat}} + (1 - R_{\text{i.r.}})F_{\text{rad}} \quad (3)$$

太陽光フラックス F_{sun} に加えて、周囲の面素からやってくる散乱光 F_{scat} と熱放射 F_{rad} から成る. F_{sun} は、面素の法線ベクトルと太陽の位置をもとに計算される. 地形によって生じる影の効果(self-shadowing)を考慮するために、太陽光を遮る他の面素がある場合には $F_{\text{sun}} = 0$ とする. 二重小惑星の場合は、主星と衛星それぞれにおいて、もう片方の天体が太陽光を遮るかどうか判定して蝕を検出する(mutual shadowing). 互いに向かい合う面が存在する場合は、ある面素から出た散乱光や熱放射が他の面素に再吸収されることで表面温度の上昇に寄与する(自己加熱, self-heating). 我々の計算モデルでは、単一散乱のフラックスのみを考慮している. アルベドの低い暗い天体では、多重散乱によるエネルギーフラックスは小さいので、温度を計算する上では無視できる. 二重小惑星では、主星と衛星の向かい合う半球どうしでやり取りされるエネルギーも温度分布に影響を与える(相互加熱, mutual heating).

一方、十分な深さの地下(thermal skin depthの数倍程度)では温度勾配がゼロになるとして、底面

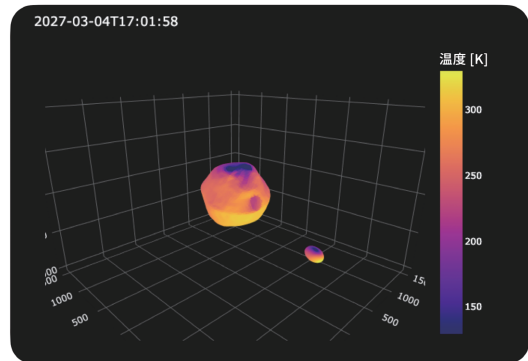


図3: 二重小惑星Didymos-Dimorphos の温度分布. 2027年3月4日17時01分58秒の天体暦にもとづく.

の境界条件を与えている.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z \rightarrow \infty} = 0 \quad (4)$$

上記の熱伝導方程式(1)を境界条件(2, 4)のもとで解き、温度分布とその時間変化を得る. 現在のバージョンでは、熱伝導方式の解法に陽的オイラー法を用いている. 今後、計算の収束性や精度を向上するべく、陰解法や高次の解法も選択できるように改良する予定である.

2.3 非重力効果の計算

上記で計算した温度分布をもとに、熱放射によって生じる圧力、すなわち非重力効果を計算することができる[13]. ここでは、形状モデルの面素は等方的に散乱および熱放射すると仮定して非重力効果を計算する. ある面素 i が放出するエネルギーの合計は以下である.

$$E_i = R_{\text{vis}}F_{\text{sun},i} + R_{\text{vis}}F_{\text{scat},i} + R_{\text{i.r.}}F_{\text{rad},i} + \epsilon\sigma T_i^4 \quad (5)$$

これを用いて、放出される光子の運動量によって面素 i に生じる力は以下のように書ける[13].

$$d\mathbf{F}_i = -\frac{2E_i S_i}{3c_0} \hat{\mathbf{n}}_i + \sum_{j \in \text{visible from facet } i} \frac{E_j S_j}{c_0} f_{i,j} \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|} \quad (6)$$

右辺第一項は、等方的な散乱と熱放射によって生じる力であり、面素に対して垂直に働く. 第二項は、向かい合う他の面素との相互作用によって生じる力を

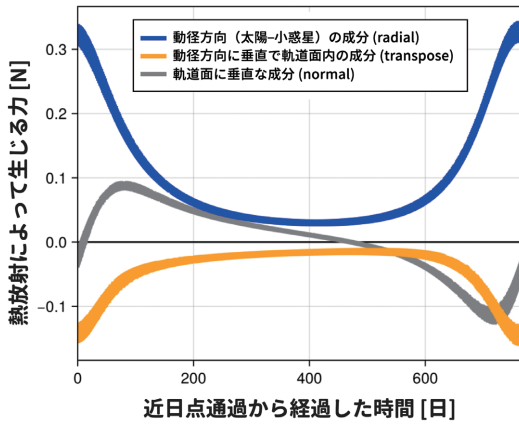


図4: 熱放射によって小惑星Didymosに働く力.

表す補正項である. 面素 i から出て面素 j に吸収される光子が生じる力は, 形態係数(view factor)に比例する. 形態係数 $f_{i \rightarrow j}$ は, 面素 i から放出されたエネルギーのうち面素 j で吸収される割合に相当する[13, 14].

$$f_{i \rightarrow j} = \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} a_j \quad (7)$$

ここで角度 θ_i と θ_j は, それぞれの面素の法線ベクトルと二つの面素をつなぐ線分とのなす角である. 式(6)の総和は, 面素 i から直接見える面素に対してだけ取ればよい. 我々の計算コードでは, 形状モデルを読み込む時に, それぞれの面素から見える面素の組み合わせを探索し, 熱物理シミュレーションに用いるようにしている.

最後に, 各面素に働く力を全球で積算することで, 小惑星の軌道と自転に対する摂動を求める. 非重力効果によって小惑星に働く力 F とトルク τ は, それぞれ以下のように書ける.

$$\mathbf{F} = \sum_i \left(\frac{\mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i|} \cdot d\mathbf{f}_i \right) \frac{\mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i|} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_i \mathbf{r}_i \times d\mathbf{f}_i \quad (9)$$

小惑星の重心運動に対する摂動(8) は軌道進化(Yarkovsky 効果)を引き起こし, 小惑星に働くトルク(9) は自転進化(YORP効果)を引き起こす.

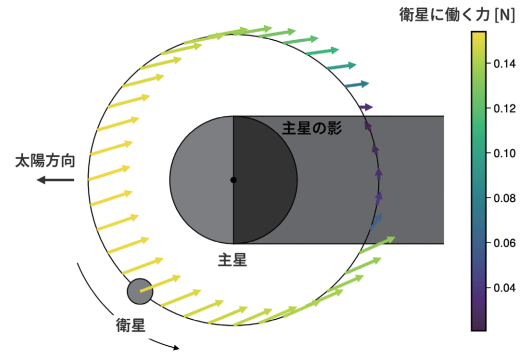


図5: 二重小惑星の衛星に働くYarkovsky効果(同期自転の場合). [22] より改変.

3. Astroshaper を用いた計算例

以下では, Hera ミッションに向けて行なっている熱物理シミュレーションとその応用例について紹介する.

3.1 Didymos に働くYarkovsky 効果

Heraミッションでは, イタリアのBologna大学やPisa大学のチームが探査機と小型衛星の軌道決定を担当する. 探査機と小型衛星の追跡, 画像航法, LIDAR測距を組み合わせ, DidymosとDimorphosの質量や高次の重力場, 自転軸の方向や自転周期を決定する予定である[15]. 太陽周りの軌道の変化については, Yarkovsky効果の検出にも取り組む. 現在, Pisa大学のチームが軌道決定から推定する非重力加速度と我々の熱物理シミュレーションから予測される非重力加速度の比較・検証を進めている.

一例として, Yarkovsky効果による小惑星Didymosの軌道長半径の変化について示す. ここでは, Heraミッションが提供するSPICEカーネルと形状モデルを用いて計算を行なった⁴. 図3 は, 小惑星DidymosとDimorphosの温度分布のスナップショットである. 衛星Dimorphosの影が主星Didymosに差し, 表面温度が低下している

⁴Hera SPICE kernels – https://s2e2.cosmos.esa.int/bitbucket/projects/SPICE_KERNELS/repos/hera/

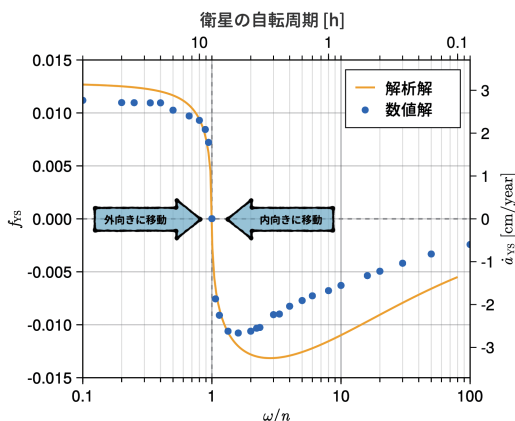


図6: Yarkovsky-Schach効果と自転速度の関係. [22] より改変.

様子を示している. こうした熱物理シミュレーションをDidymosの軌道周期(769日)にわたって行ない, 非重力加速度の時間変化を調べた. ここでYarkovsky効果の計算にあたっては, 計算時間を削減するため, Didymosを単独の小惑星と見做し, 衛星による蝕や相互加熱の影響は無視した. 熱慣性は, S型小惑星として典型的な $\Gamma = 403$ tiuを与えた[16].

図4は, 熱放射によって小惑星Didymosに生じる力を示す. 太陽から小惑星に向かう動径方向(radial)とそれに垂直な方向(transpose, normal)に沿った成分をプロットした. 小惑星Didymosは逆行自転しており, 自転軸も軌道面に対して直立している[17]. 逆行自転の小惑星では, 熱放射は天体の軌道運動に対して前方に卓越し, 反作用として生じる力は軌道運動にブレーキをかける(transpose成分は常に負となる). 結果として, 角運動量を失って小惑星の軌道は内側に縮むことになる. 反対に, 順行自転する小惑星では外向きの軌道進化となる. ガウスの惑星方程式を用いると, 小惑星に働く加速度(A_R , A_T , A_N)から軌道要素の変化を得ることができる[10, 18]. 軌道長半径の変化は, 軌道面内の成分によって引き起こされ, 以下の式で表される.

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{n\sqrt{1-e^2}} \left[e \sin \nu A_R + \frac{a(1-e^2)}{r_h} A_T \right] \quad (10)$$

図4を軌道長半径の変化に換算し, 公転周期で平均すると, $da/dt = -56$ m/yrとなる. 今回のDidymosに働く力を A_2 パラメータに換算すると, -8.2×10^{-15} au/d²となる. 現在, JPL Small-Body Database⁵から得られる値 $A_2 = -1.04 \times 10^{-14}$ au/d²と比較するとやや小さな値である. 今後, 計算モデルやパラメータを改良しながら, 観測される軌道進化と熱物理モデルによる予測との整合性を検討していく.

3.2 二重小惑星の衛星のYarkovsky 効果

次に, 二重小惑星の衛星の長期進化においてYarkovsky効果が果たす役割について紹介する. 二重小惑星における衛星の軌道や自転の進化として, 潮汐による影響やbinary YORP (BYORP) 効果が知られている[19]. 最近我々は, 二重小惑星の衛星に働くYarkovsky-Schach効果に注目して研究を行っている. Yarkovsky-Schach 効果はもともと, 土星のリング粒子の軌道進化メカニズムとして研究されてきた[20, 21]. 衛星が主星の影に入ることによって冷却され, 熱放射に異方向性が生じると考えられる. フランスとチェコの研究者が中心となって解析モデルを構築し, 我々のAsteroidThermoPhysicalModels.jlを用いた熱物理シミュレーションと比較して検証を行った[22].

図5は, 熱放射によって衛星に生じる力を示したものである. 主星と衛星はそれぞれ半径1,000 mと200 mの球体とし, 密度はともに $2,000$ kg/m³, 熱慣性はともに331 tiuとして熱物理シミュレーションを行なった. 二重小惑星を太陽から1 auの場所に固定し, 衛星が主星の周りを円軌道で公転する系を仮定した. また, 衛星が主星の周りを公転する相互軌道周期を8hに固定した(公転軌道の半径は2279 mに相当する). 衛星の自転周期も8時間であれば, 図5の同期回転の場合に相当する. 衛星が主星の影に入ると, 熱放射によって衛星に働く力が弱まり, 力の方向も変化する様子がわかる. これによって生じる加速度を軌道周期にわたって平均し, 長期的な軌道進化への影響を考える.

軌道長半径の変化は, 式(10)を用いて, $e = 0$ として計算した. Yarkovsky-Schach効果の大きさ

⁵Small-Body Database (65803 Didymos) – https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=didymos

を表す無次元係数 f_{YS} を導入し、軌道長半径の変化率を以下のように表す。

$$\dot{a}_{YS} = \frac{2f_{YS}}{n} \frac{\Phi(1 - R_{vis})\pi r_2^2}{m_2 c_0} \quad (11)$$

相互軌道周期が8hの同期回転の場合に加えて、衛星の自転周期を変えてYarkovsky-Schach効果の大きさを調べた。図6は、縦軸に係数 f_{YS} を、横軸に衛星の自転速度 ω と軌道平均運動 n の比をとったものである。橙色の線は[22]による解析解、青色の点は熱物理シミュレーションによる数値解を表している。衛星が軌道運動よりも遅く自転している $\omega/n < 1$ の領域では、 f_{YS} は正の値をとる。これは、衛星の軌道周期と自転周期が同期する軌道の内側では、衛星の軌道半径が大きくなり、同期軌道に向かって外側に動くことを意味する。一方で、軌道運動よりも速く自転している $\omega/n > 1$ の領域では、 f_{YS} は負の値をとる、内向きに軌道進化する。 $\omega/n = 1$ となる同期軌道では、Yarkovsky-Schach効果による軌道半径の変化は止まる。今回の計算例では、 $f_{YS} = 0.01$ に相当する軌道半径の変化率は2.5 cm/year程度である。

二重小惑星の相互軌道面は、太陽周りの公転軌道面と比較的よく一致していることが分かっている[23]。このように相互軌道面の傾斜角が小さな二重小惑星では、蝕が頻繁に発生し、Yarkovsky-Schach効果によって同期軌道まで運ばれる作用が働く。その後は、潮汐とBYORPが釣り合って長期間安定した二重小惑星となるか、あるいは軌道進化を続けて主星と衛星が合体してcontact binaryとなるか、離散してspilit pairとなる進化が予想される。Yarkovsky-Schach効果は、探査機DARTの衝突によって同期自転から外れた状態にある衛星Dimorphosにおいて重要な軌道進化メカニズムとなりうる。

4. おわりに

我々は小惑星の力学シミュレータAstroshaperを開発し、熱物理シミュレーションの機能を強化してきた。小惑星の3次元形状や天体暦にもとづいて温度分布を計算し、軌道や自転に対する摂動を推定す

ることができるようになった。これらのコード資産を活かしながら、Heraミッションでは二重小惑星の熱撮像にもとづく熱物性の推定、および非重力効果が支配するダイナミクスの解明に取り組む。

謝辞

本研究は、JSPS科研費JP22J00435/JP22KJ0728の助成を受けた。また、文部科学省「特色ある共同利用・共同研究拠点支援プログラム」(JPMXP0622717003/JPMXP0723830458)にもとづき、会津大学宇宙情報科学研究センターの協力を得て遂行された。本稿執筆にあたり、谷川享行博士が作成したLATEX テンプレートを利用させて頂いた。さらに、遊星人編集部や査読者の方々には、原稿の改善のために有益な助言をいただいた。ここに感謝申し上げる。

参考文献

- [1] McMahon, J. W. et al., 2020, J. Geophys. Res. Planets 125, e2019JE006229.
- [2] Lauretta, D. S., 2019, Science 366, eaay3544.
- [3] Okada, T. et al., 2020, Nature 579, 518.
- [4] Shimaki, Y. et al., 2020, Icarus 348, 113835.
- [5] Senshu, H. et al., 2022, Int. J. Thermophys. 43, 102.
- [6] Simon, A. A. et al., 2019, Geophys. Res. Lett. 46, 6322.
- [7] Rubincam, D. P., 2000, Icarus 148, 2.
- [8] Bottke, W. F. et al., 2006, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 34, 157.
- [9] Giorgini, J. D. et al., 2002, Science 296, 132.
- [10] Farnocchia, D. et al., 2021, Icarus 369, 114594.
- [11] Michel, P., 2022, Planet. Sci. J. 3, 160.
- [12] Kanamaru, M. et al., 2021, J. Geophys. Res. Planets 126, e2021JE006863.
- [13] Rozitis, B. and Green, S. F., 2012, Mon. Not. R. Astron. Soc. 423, 367.
- [14] Lagerros, J. S. V., 1998, Astron. Astrophys. 332, 1123.
- [15] Gramigna, E. et al., 2024, Planet. Space Sci. 246, 105906.

- [16] Delbo, M. et al., 2015, in Asteroids IV (Univ. of Arizona, Tucson), 107.
- [17] Naidu, S. P. et al., 2020, *Icarus* 348, 113777.
- [18] Murray, C. D. and Dermott, S. F., 2000, *Solar System Dynamics* (Cambridge University-Press).
- [19] Čuk, M. and Burns, J. A., 2005, *Icarus* 176, 418.
- [20] Rubincam, D. P., 2006, *Icarus* 184, 532.
- [21] Vokrouhlický, D. et al., 2007, *Icarus* 191, 636.
- [22] Zhou, W.-H. et al., 2024, *ApJL* 968, L3.
- [23] Pravec, P. et al., 2012, *Icarus* 218, 125.