

小惑星軌道解析システムの開発

山口 智宏¹⁾・坂本強²⁾・黒田大介³⁾・伊藤孝士³⁾・吉川 真⁴⁾

¹⁾ 総合研究大学院大学, ²⁾ 日本スペースガード協会, ³⁾ 国立天文台, ⁴⁾ ISAS/JAXA

Development of Trajectory Analysis System for Asteroids

Tomohiro YAMAGUCHI¹⁾, Tsuyoshi SAKAMOTO²⁾, Daisuke KURODA³⁾,
Takashi ITO³⁾, Makoto YOSHIKAWA⁴⁾

Abstract

The trajectories of the asteroids are important not only for the scientific motivation, but also for monitoring the Potentially Hazardous Asteroids (PHAs). A lot of observatories make efforts for searching and tracking PHAs, and have discovered some dangerous asteroids, like 99942 Apophis (2004 MN4) etc. The accurate trajectory is estimated by orbit determination method using optical and radar observation. Since the close approaches of PHAs are quite sensitive problem, comparing the result with several analyses are important. In this paper, the development of trajectory analysis system for asteroids are introduced. Especially, the prediction method of impact probability for PHAs is investigated. The analysis for close approaches of Apophis and 2008TC3 are described as an example.

Key Words: Near Earth Object, Impact probability, Orbit estimation

1 緒論

小惑星は地球や火星などの大型天体のように熱変成や地殻変動を受けていない可能性が高く、太陽系創生時の組成をそのまま保っていると考えられている。の中でも地球近傍小惑星は宇宙機で直接探査するために必要なエネルギーが比較的小さいため、これまでにも小惑星探査機はやぶさなど数多くの探査がなされてきた¹⁾。

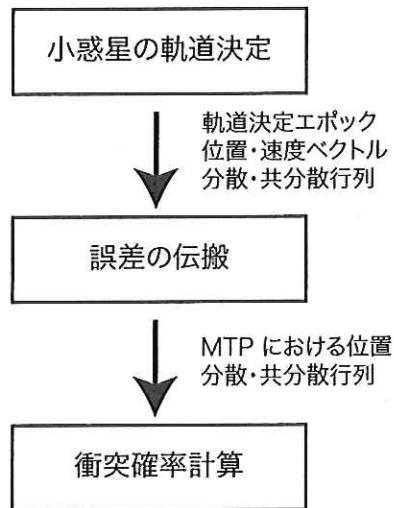
しかしながら、そのような小惑星の中には地球に接近し、衝突する可能性のあるものも存在する。これまでにも月軌道よりも内側に接近した小惑星があったことも分かっている²⁾。

そのような小惑星は常に警戒し観測し、その軌道を監視する必要がある。NASAでは“Spaceguard”と呼ばれる地球近傍小惑星の観測プログラムが行われている。このプログラムでは直径1 km以上の地球近傍小惑星の90%を発見することを目標としている。今後はさらに小さい小惑星を発見するために、PanSTARRS4やLSSTなどの計画が進行中である³⁾。このようなプログラムで発

見された小惑星は、観測データから軌道が計算され、地球などの天体との衝突確率が求められる。これまでにも1997XF11や1999AN10などが地球に接近する小惑星として計算されている^{2), 4)}。

そのような軌道解析システムは主にNASA/JPL、やピサ大学などで盛んに行われている。日本では、美星スペースガードセンターなど数多くの施設で、小惑星の発見・観測を行っているにも関わらず、独自の軌道解析システムを保持していない。そのようなシステムを構築することができれば、よりデータ処理が迅速になり、より効率的な観測が可能になると考えられる。

本発表では、小惑星軌道解析システムに関して、特に軌道解析に関して述べる。具体的には、小惑星の観測データから衝突確率を計算する手法を説明していく。また具体例として、2029年に地球に接近する小惑星99942 Apophisと2008年10月に地球に衝突した小惑星2008 TC3に関する軌道解析を紹介する。



2 小惑星の衝突確率計算

小惑星の天体衝突確率計算は以下の 3 つのステップからなる。

1. 小惑星の軌道決定
2. 決定誤差の伝搬
3. 衝突確率の計算

その計算の流れを Fig. 1 に示す。

2.1 小惑星の軌道決定

衝突確率計算をするためには、まず小惑星の軌道を決定する必要がある。小惑星の軌道決定には重み付き最小二乗法を用いた。推定パラメータ X はある時刻 t_0 における位置・速度ベクトルである。観測量は光学観測による赤経 α ・赤緯 δ 、レーダー観測によるレンジ・ドップラーである。観測値と計算値の残差を $\rho = \rho(X)$ とおき、観測数を m とすると、軌道決定は次式の評価関数 Q を最小化する問題となる。

$$Q = \frac{1}{m} \rho^T W \rho \quad (1)$$

W は重み行列であり、観測精度 σ_w を反映している。

本研究において小惑星の軌道伝搬は次式を用いた。

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{\mu_s}{r^3} r + \sum_{k=1}^n \mu_k \left(\frac{r_k - r}{|r_k - r|^3} - \frac{r_k}{r_k^3} \right) + \Delta \quad (2)$$

r は太陽中心の位置ベクトル、 μ は重力定数、 n は考慮する摂動天体の数を示している。 Δ は太陽の一般相対論による加速度を表している。本研究では摂動天体として、8 惑星、冥王星と 3 大小惑星 (Ceres, Pallas, Vesta) を考慮した。太陽、8 惑星、冥王星、月の天体暦は JPL Ephemeris DE405 を用い、小惑星の天体暦は JPL Horizons が提供している値を補間した。

これらから、軌道決定エポック t_0 、そのときの位置・速度ベクトル X^* 、それに対する分散・共分散行列 C_X が求められる。

2.2 誤差の伝搬

ここでは、軌道決定によって求められた分散・共分散行列 C_X を MTP (Modified Target Plane) における分散・共分散行列 C_{CA} に伝搬させることを説明する。以後下付き文字 CA は小惑星の天体最接近時刻を示す。

天体接近時刻 t_{CA} は軌道決定から得られた軌道決定値 X_0 を軌道伝搬させ、対象天体との距離を監視して求める。

小惑星が天体に接近した場合には MTP (Modified Target Plane) 座標系を用いる。MTP 座標系 ($S_{MTP}, T_{MTP}, R_{MTP}$) は S_{MTP} 軸が小惑星の最接近時の天体相対速度ベクトル V_{CA} 方向、 T_{MTP} 軸が赤道面と平行かつ S_{MTP} 軸と垂直に交わる天体中心直交座標系である。一般的に用いられる B-plane 座標系とは基準となる速度ベクトルが異なる (Fig. 2)。

MTP 座標系における分散・共分散行列 C_{CA} は遷移行列 $\Phi (= \partial X_{CA} / \partial X^*)$ と慣性系から MTP 座標系への回転行列 R を用いて次式で

$$C_{CA} = (R\Phi) C_X (R\Phi)^T \quad (3)$$

遷移行列 Φ は変分方程式を用いて、軌道とともに数値計算される。

2.3 衝突確率計算

衝突確率計算は MTP ($R_{MTP} T_{MTP}$ 面) に投影された誤差楕円が天体に重なる部分を積分して求められる。

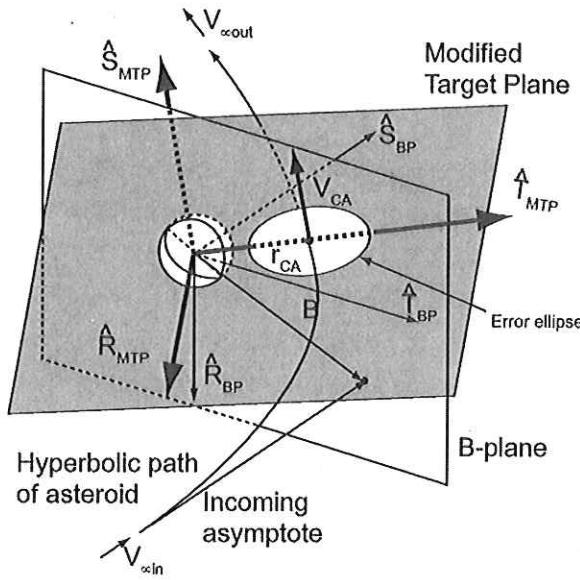


Fig. 2 B-plane と MTP 座標系

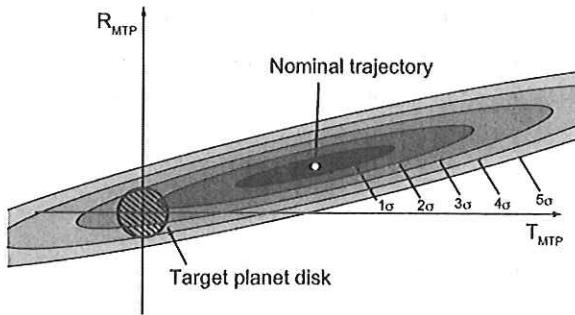


Fig. 3 2次元正規分布と積分領域

MTP 座標系におけるノミナル値 X^* からのずれを ΔX とする。 ΔX が十分に小さい場合、誤差楕円体は MTP 座標系における分散・共分散行列 C_{CA} を用いて次式で表される⁵⁾。

$$(\Delta X)^T C_{CA}^{-1} (\Delta X) \leq \sigma^2 \quad (4)$$

σ は考慮する誤差の大きさを示す。

このように計算された誤差楕円体を MTP に投影し、Fig. 3 のような 2 次元確率密度関数を求める。そして、確率密度関数と天体に対応する円の領域分を積分し衝突確率とする。2 次元確率密度関数と円が重なる領域の計算には Michel のアルゴリズム⁶⁾を用いた。

Table 1 小惑星 Apophis の軌道決定値 (2008/01/09)

		Value	Uncertainty (1σ)
a	AU	0.92227942047386	1.81732060369818e-08
e		0.19108999052203	6.47122581352282e-08
i	deg	3.33133956968007	1.65101167930690e-06
Ω	deg	204.456926239662	7.56680683027179e-05
ω	deg	126.391669170777	7.53698300836189e-05
M	deg	253.006675342956	3.20902347627226e-05

3 軌道解析の具体例

3.1 小惑星 Apophis

ここでは小惑星 99942 Apophis を例として地球衝突確率を計算する。Apophis は 2004 年 6 月に初めて観測された直径約 270 m の天体である。これまでに数多くの観測がなされ、2029 年 4 月 13 日に地球中心から約 38,000km を通過する予測されている。この天体は 2036 年に再び地球に接近することが分かっており、注目を集めている。

この天体の光学観測は 2004 年 2 月から 2008 年 1 月までの約 3.8 年行われている。この間に 5 回のレーダー観測が成功しており⁷⁾、それらを用いて軌道決定を行い、その軌道決定値を Table 1 に示す。 a は軌道長半径、 e は離心率、 i は軌道傾斜角、 Ω は昇交点経度、 ω は近点引数、 M は平均近点距離を示す。Table 1 に示す決定誤差は観測精度 σ_w を 1.0 arcseconds (1σ) とした値である。

この軌道決定値を用いて、小惑星 Apophis の地球衝突確率を計算する。軌道決定によって求められた分散・共分散行列を最接近時刻 t_{CA} まで伝搬させ、MTP 上の誤差楕円を求める。Fig. 5 に 2029 年地球接近における 3σ の誤差楕円を示す。そして、2029 年の地球接近に関する計算結果を Table 2 にまとめる。ここで、ノミナル接近距離は軌道決定値を最接近時刻 t_{CA} まで伝搬したときの地球中心からの距離を示し、最悪接近距離は 3σ の誤差楕円まで考慮した最小距離を示す。 3σ まで考慮しても 30,000 km より近づくことは無く、2029 年地球

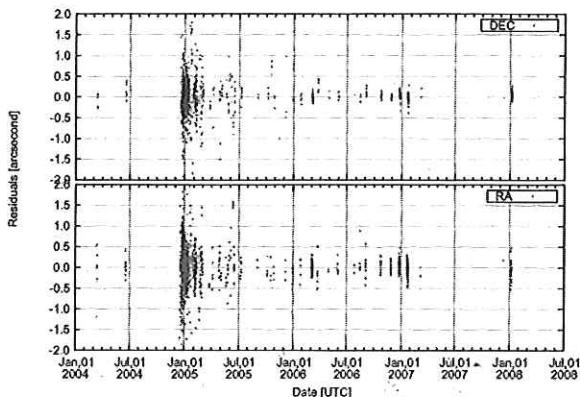
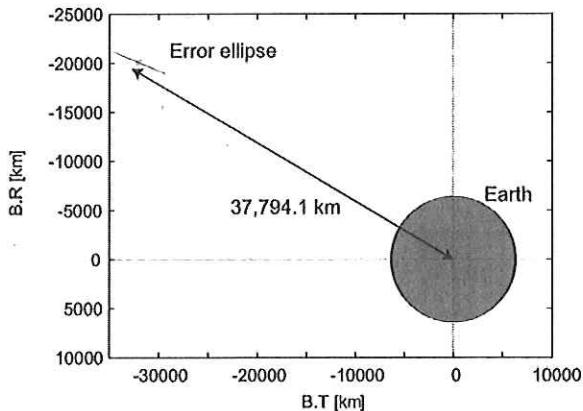


Fig. 4 小惑星 Apophis の残差

Table 2 Apophis 2029 Earth encounter

最接近時刻 (TDB)	2029/04/13-21:45:36.859
ノミナル接近距離 (km)	37794.18
相対速度 (km/s)	7.430686
衝突確率 (%)	0.000

Fig. 5 Apophis 2029 年地球接近における誤差楕円 (3σ)

接近における衝突確率は 0 であることが分かる。

3.1.1 誤差楕円が成り立たない場合

軌道決定誤差が大きい場合、式(4)の ΔX が大きくなってしまい、誤差領域を楕円体と近似することが出来なくなる。その例として小惑星 Apophis の 2036 年地球接近について計算する。2036 年の Apophis の軌道誤差は 2029 年の地球接近のために非常に大きくなる。共

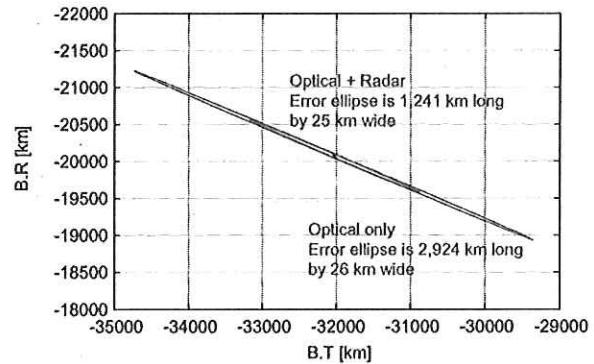
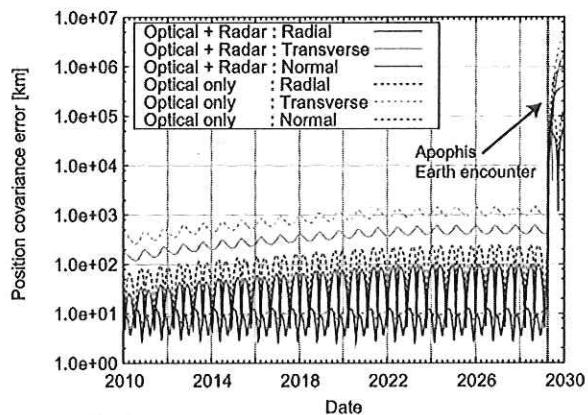
Fig. 6 Apophis 2029 年地球接近における誤差楕円 (3σ)

Fig. 7 小惑星 Apophis の軌道予報誤差

分散解析により、誤差を伝搬し、2010 年から 2030 年までの位置予報誤差を計算した。Fig. 7 には位置予報誤差を動径方向 R 、軌道面垂直方向 N 、それらに直行する方向 $T = N \times R$ の成分として表している。また、実線は光学観測とレーダー観測の両方を用いた軌道決定解、鎖線は光学観測のみを用いた軌道決定解の共分散を伝搬している。全体を通じて軌道面内の誤差が大きく、特に Transverse 方向の誤差が大きいことが分かる。また、レーダー観測は光学観測に比べ、観測数が非常に少ないにも関わらず精度向上に寄与していることが見て取れる。どちらのケースにしても 2029 年の地球接近を境に誤差が急激に拡大しており、誤差を線形近似することが不可能であることが分かる。そのことをより明らかにするために、2036 年地球接近における Apophis の位置

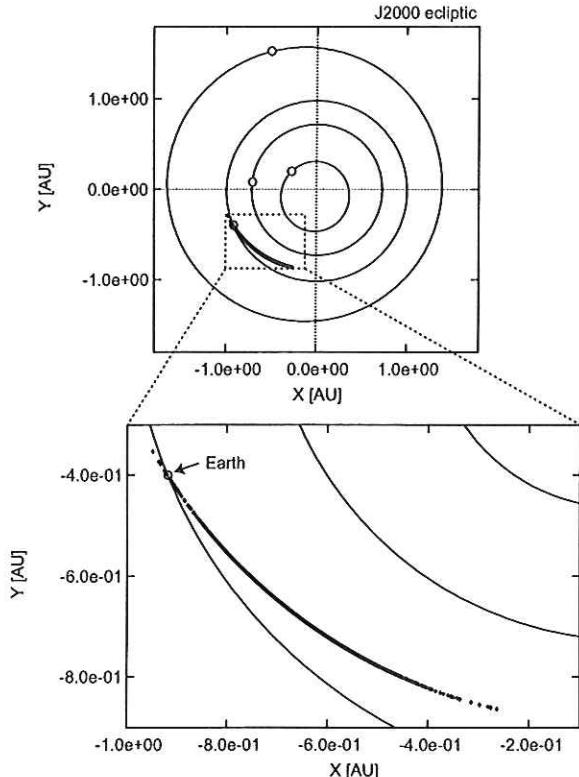


Fig. 8 Apophis の地球接近 (2036 年)

に関するモンテ・カルロシミュレーションを行った。2036 年の最接近時刻を 4 月 13.375 日 (UTC) としたモンテ・カルロシミュレーションの結果を Fig. 8 に示す。サンプリング数は 1500 点である。誤差が大きいと Fig. 8 のように湾曲した誤差領域となり、楕円に近似することが出来ないことが分かる。

3.2 小惑星 2008TC3

小惑星 2008TC3 は 2008 年 10 月 6 日に発見され、その数時間後に地球に衝突した。大きさは 2-3 m と推測されている。このようなサイズの小惑星は数ヶ月に 1 度の頻度で地球に衝突しているが、予め衝突することが予測できたことは初めてであった。発見されてから地球衝突まで約 20 時間しか無かつたが、500 点以上の光学観測がなされており、非常に注目された天体であったことが分かる。2008TC3 はアポロ型の軌道をとる小惑星で、周期は約 1.5 年である。ここでは、観測数による誤差楕円の違いを明らかにするために、2008TC3 の観測において、

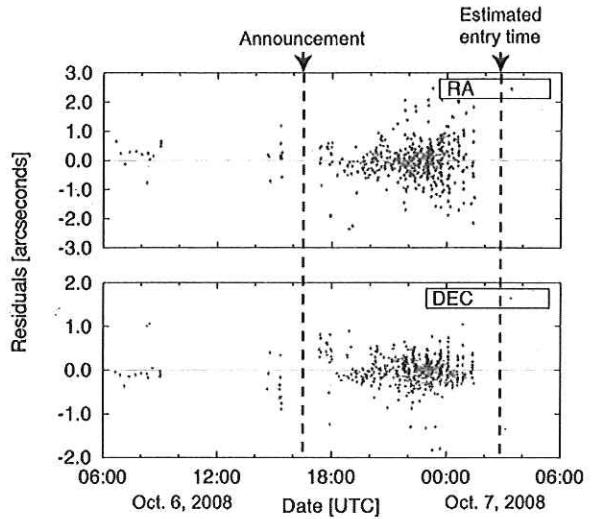


Fig. 9 小惑星 2008TC3 の残差

(1) 地球衝突がアナウンスされる前までのデータ、(2) 地球衝突までのすべてのデータ、の 2 ケースを計算し比較する。ケース 1 における観測数は 26 であり、ケース 2 における観測数は 531 であり、その光学観測の残差を Fig. 9 に示す。地球衝突のアナウンス後に観測数が急激に増えていることが分かる。軌道決定解は両ケースともにほぼ同じであるが、その軌道誤差は大きく異なる。2 つのケースの軌道誤差を比較するために、Fig. 10 にそれぞれのケースにおける地球突入時の誤差楕円を前述の MTP 座標系で表す。ケース 2 の誤差楕円はケース 1 の誤差楕円と比べ、 $1/40$ の大きさになっており、予測精度が観測数に応じて良くなっていることが分かる。

2008TC3 の地球衝突に至る軌道を地球-太陽方向固定の回転座標系で Fig. 11 に示す。ここから分かるようにこの小惑星は夜側から地球に接近しており、そのため衝突直前までの観測が可能であった。この接近軌道の直下履歴を Fig. 12 に示す。地球の自転により、直下点は東から西へ移動し、最終的にはスーダン上空で大気圏に突入していることが見て取れる。大気圏突入時の地表面に沿った誤差楕円は長半径が 7 km 程度の大きさとなる。Fig. 13 には地表面に沿った 3σ の誤差楕円とモンテカルロシミュレーションの結果を重ねて示している。モンテカルロシミュレーションの点はほぼすべてが誤差楕円内に収まっており、計算が正しく行われていることが検

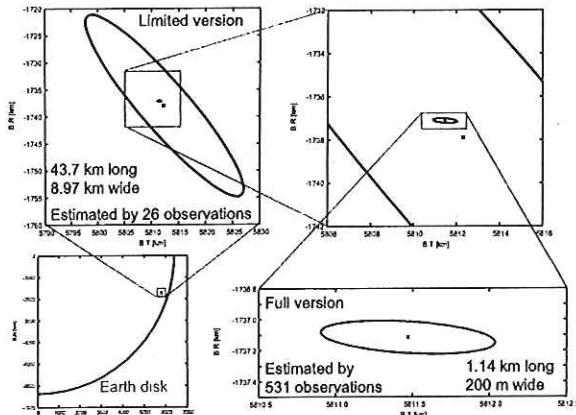


Fig. 10 小惑星 2008TC3 の地球突入時の誤差椭円

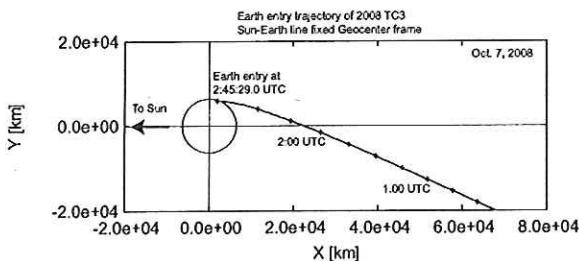


Fig. 11 小惑星 2008TC3 の地球衝突軌道（地球-太陽方向固定）

証されている。

4 結論

本発表では、小惑星軌道解析システムの開発について、特に軌道計算の詳細と検証結果について説明した。具体例として、2029年に地球接近する小惑星 Apophisと2008年10月に地球に衝突した小惑星 2008TC3に関する軌道解析を行い、その結果の正当性を確認した。

小惑星 Apophis の解析ではレーダー観測の有効性を、小惑星 2008TC3 の解析では観測数と軌道予報精度の関係を定量的に評価した。

今後は実際にこのシステムを運用し、そこから発生するであろう不具合に対処していく予定である。

参考文献

- 1) Kawaguchi,J., Fujiwara,A. and Uesugi,T., *Hayabusa - Its technology and science accom-*

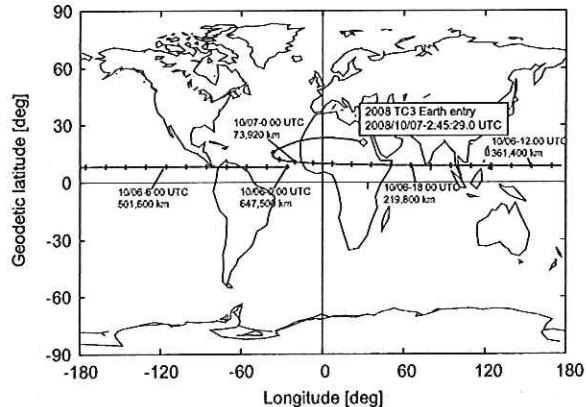


Fig. 12 小惑星 2008TC3 の直下点履歴

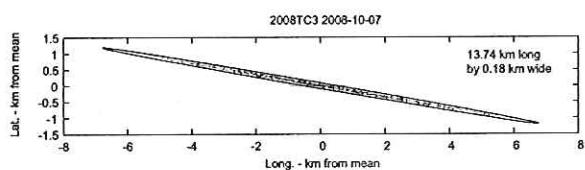


Fig. 13 小惑星 2008TC3 の地表面に沿った誤差椭円

plishment summary and Hayabusa-2, *Acta Astronautica*, vol.62, 639-647., 2008.

- 2) Chodas, P. W. and Yeomans, D. K., *Orbit determination and estimation of impact probability for Near Earth Objects*, AAS 99-002, 1999.
- 3) NASA, *Near-earth object survey and deflection: analysis of alternatives. Report to Congress*, 2007
- 4) Milani, A., Chesley, S. R. and Valsecchi, G. B., *Close approaches of asteroid 1999 AN10: resonant and non-resonant returns*, A&A, 1999.
- 5) ByronD. T., BobE. S. and GeorgeH. B., *Statistical Orbit Determination*, Academic Pr., 2003.
- 6) Michel, J.R., *A New Method for Accurately Calculating the Integral of the BivariateGaussian Distribution over an Offset Circle*, JPL Eng. Memo. 312/77-34, 1977.
- 7) Giorgini,J. D., Benner,L. A. M., Ostro,S. J., Nolan,M. C. and Busch,M. W., *Predicting the Earth encounters of (99942) Apophis*, Icarus, 2008.

(2009年12月21日受付, 2010年1月15日受理)