

小惑星の地球衝突確率計算について

山口 智宏¹⁾・吉川 真²⁾

¹⁾ 総合研究大学院大学, ²⁾ ISAS/JAXA

Predicting the Impact Probability for Asteroids to the Earth

Tomohiro YAMAGUCHI¹⁾, Makoto YOSHIKAWA²⁾

Abstract

Many scientists are interested in asteroids, which have the data of the planetary formation process. But some asteroids approach the Earth and have possibility of impacting the Earth. A lot of observatories make efforts for searching Near-Earth Objects (NEOs), and have discovered some dangerous asteroid, like 99942 Apophis (2004 MN4) etc. The impact probability of these NEOs has been calculated by several methods. Since the close approaches of NEOs are quite sensitive problem, comparing the result with several analyses are important. In this paper, prediction method of impact probability for NEOs is investigated. The analysis for close approaches of Apophis and 2007WD5 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近く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。そ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)}。

本発表では、小惑星の観測データから衝突確率を計算

する手法を説明する。また具体例として、2029年に地球に接近する小惑星99942Apophisと2008年1月末に火星に接近した小惑星2007WD5について述べる。

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 であり、観測値と計算値の残差を $\rho = \rho(X)$ とする。このとき、観測数を m とすると軌道

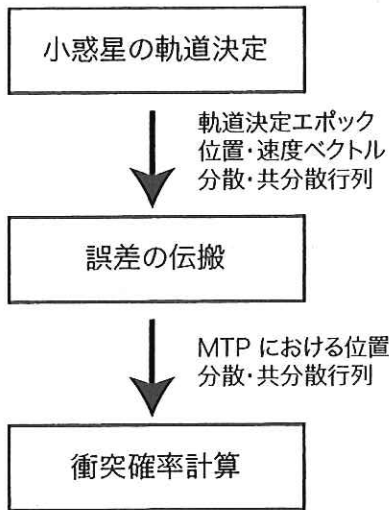


Fig. 1 小惑星衝突確率計算の流れ

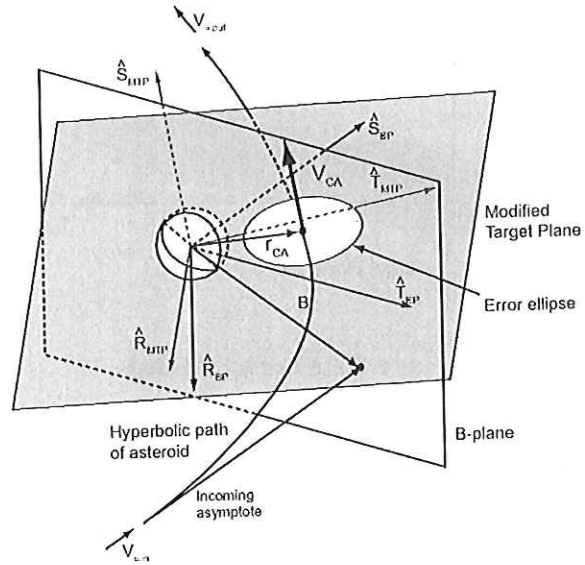


Fig. 2 B-plane と MTP 座標系

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。

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

\mathbf{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。

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

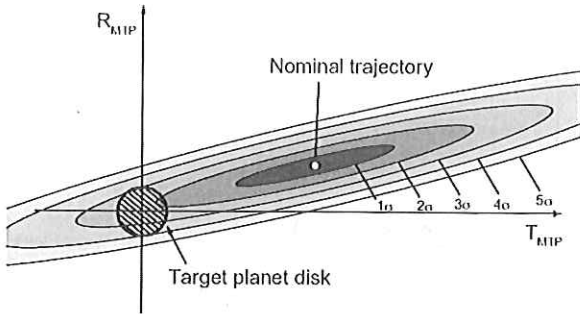


Fig. 3 2次元正規分布と積分領域

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。

3 計算結果および考察

3.1 小惑星 Apophis の例

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。

まず、2004 年 3 月から 2006 年 8 月までの約 2.4 年で行われた光学観測に基づいて軌道決定を行った。Table 1 に軌道決定を行った結果を示す。 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 は平均近点離角を示す。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。軌道決定には残差が 2.0 arcseconds より小さい 986 点の観測を用いた。全観測を含んだ残差を Fig. 4 に示す。

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

Table 1 小惑星 Apophis の軌道決定値 (2008/5/14.0)

	Value	Uncertainty (1σ)
a AU	0.9224082716	9.95803806e-08
e	0.1911777108	3.72952034e-07
i deg	3.3314018464	5.78335595e-06
Ω deg	204.44800475	1.06188046e-04
ω deg	126.38626504	1.08841089e-04
M deg	32.481408398	2.12724026e-04

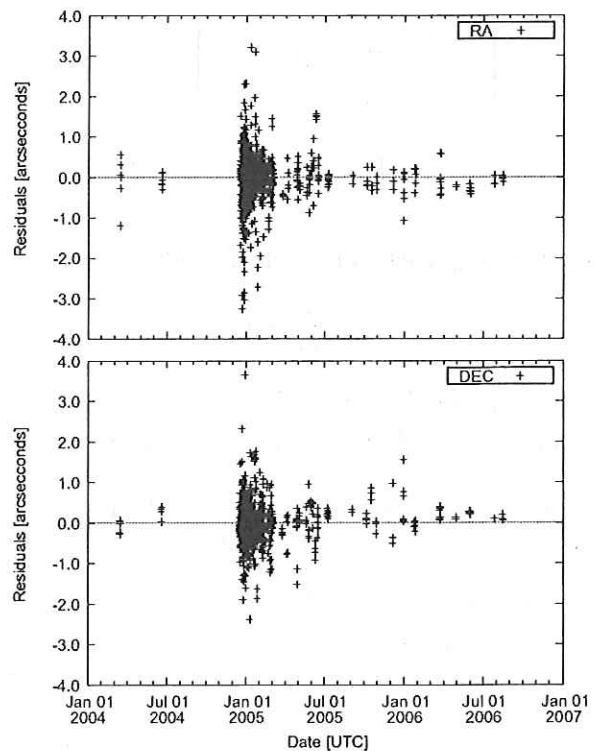


Fig. 4 小惑星 Apophis の残差

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 年地球接近における衝突確率は 0 であることが分かる。

Table 2 Apophis 2029 Earth encounter

最接近時刻 (TDB)	2029/04/13- 21:46:10.589
ノミナル接近距離 (km)	37870.65
最悪接近距離 (km)	31098.64
相対速度 (km/s)	7.427809
衝突確率 (%)	0.000

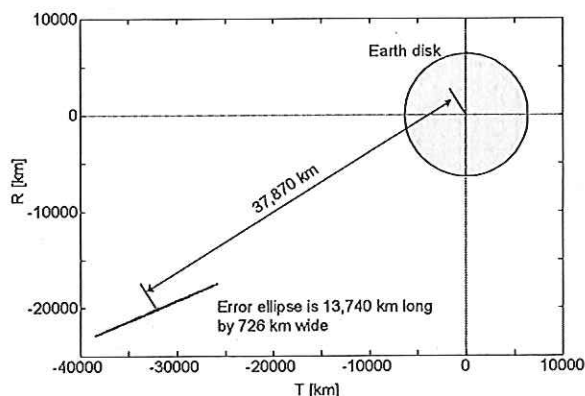


Fig. 5 Apophis 2029 年地球接近における誤差楕円 (3σ)

3.2 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。誤差の大きさの推移をみるために誤差楕円体の体積比を計算する。Fig. 6 には基準を 2005 年 5 月 13 日とした場合の誤差楕円体の体積比をプロットしており、2029 年の地球接近において誤差が急激に大きくなっていることが分かる。

最接近時刻を 2036 年 4 月 13.375 日 (UTC) とし、黄道面における Monte Carlo シミュレーションの結果を Fig. 7 に示す。サンプリング数は 1500 点である。誤差が大きいと Fig. 7 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。

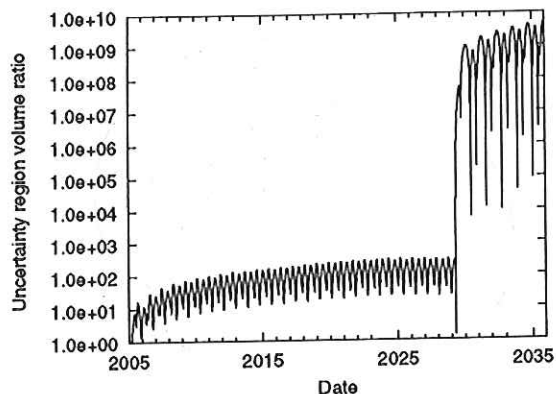


Fig. 6 誤差の変化

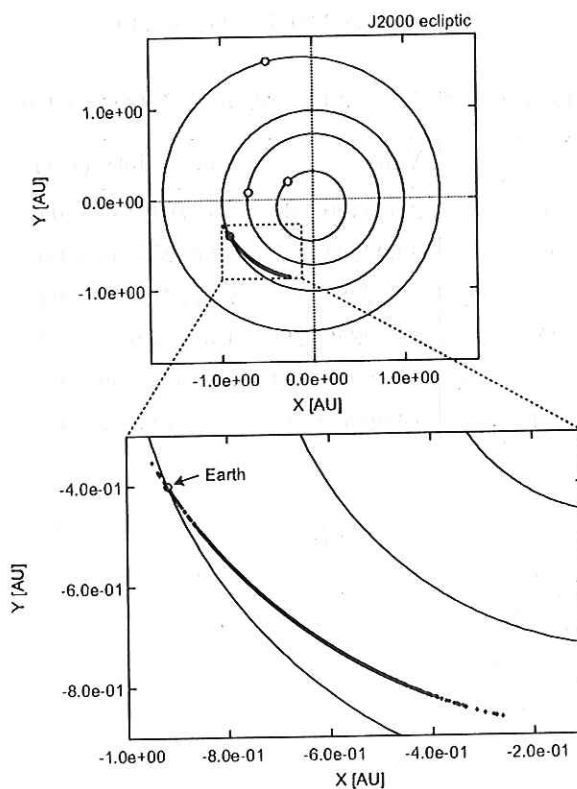


Fig. 7 Apophis の地球接近 (2036 年)

3.3 小惑星 2007WD5 の場合

最近の例として火星に接近した小惑星 2007WD5 の火星衝突確率を計算する。

小惑星 2007WD5 は 2007 年 11 月に発見され、その直径は約 50 m と推測されている。2007 年 11 月 1 日に

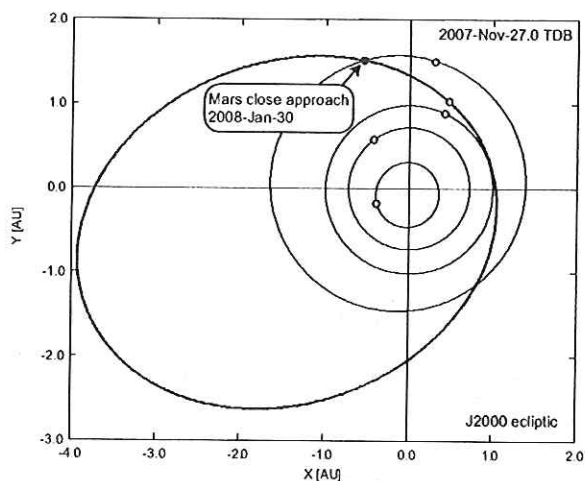


Fig. 8 小惑星 2007WD5 の軌道図

Table 3 小惑星 2007WD5 の軌道決定値 (2008/1/9.0)

	Value	Uncertainty (1σ)
a AU	2.5444907097	5.7376891847e-04
e	0.6029941339	8.8682556536e-05
i deg	2.3772859384	2.6777181925e-04
Ω deg	67.423553211	1.5235721832e-04
ω deg	312.82365824	6.5504195001e-04
M deg	19.998600515	6.7741342774e-03

地球から 750 万 km の距離を通過し、2008 年 1 月 30 日に火星に最接近した。その軌道図を Fig. 8 に示す。

本研究においては、2007 年 11 月から 2008 年 1 月までの 2 ヶ月間の観測データを用いて軌道決定した。観測点の数は 44 である。Table 3 にその決定値をまとめる。なお、誤差は観測精度を 0.6 arcseconds にした場合の値である。Fig. 9 に全観測を含んだ残差を示す。

Apophis の場合と同様に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。その計算結果を Table 4 と Fig. 10 に示す。Apophis の例と比べ、観測数が少ないので誤差が大きく、誤差楕円も大きい。

衝突確率は誤差楕円を積分して求めるので、観測精度と密接な関係がある。Table 5 に観測精度 (σ_w) を変化させた場合における 3σ 誤差楕円の長半径 (SMAA) と

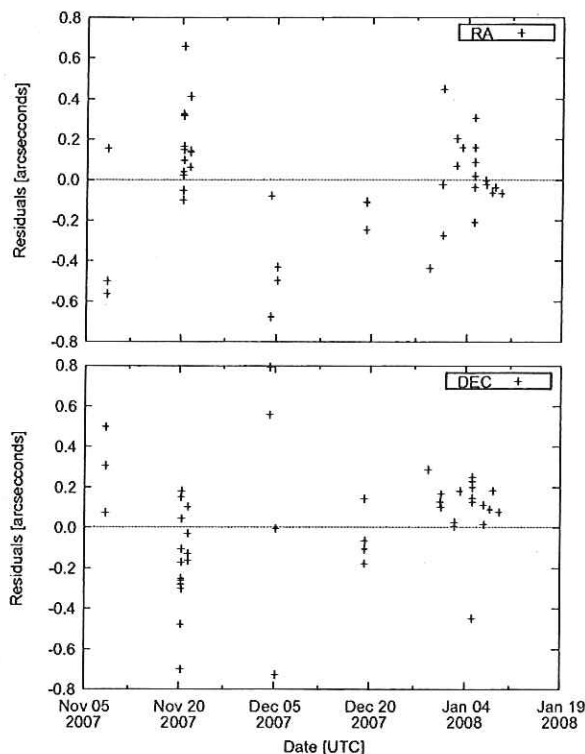


Fig. 9 小惑星 2007WD5 の残差

Table 4 2007WD5 Mars encounter

最接近時刻 (TDB)	2008/01/30- 12:00:51.090
ノミナル接近距離 (km)	27899.26
最悪接近距離 (km)	6111.18
相対速度 (km/s)	12.6314
衝突確率 (%)	0.0346

衝突確率をまとめる。これらは 2007WD5 の火星接近に関する値である。また、Fig. 11 にはそれぞれの観測精度における誤差楕円を示した。このように観測精度は衝突確率計算に大きな影響を及ぼすので、慎重に決定する必要がある。

4 結論

本研究では観測データからの小惑星の天体衝突確率計算に関して説明した。具体例として小惑星 Apophis の地球衝突確率計算と小惑星 2007WD5 の火星衝突確率計算

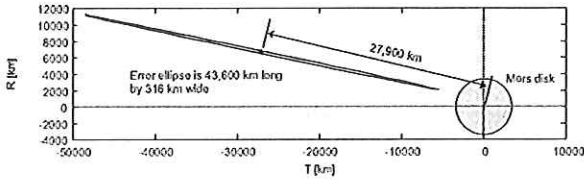


Fig. 10 小惑星 2007WD5 の誤差楕円

Table 5 観測精度と衝突確率

観測精度 (1σ) arcseconds	SMAA km	衝突確率 %
0.5	18,196	0.0023
0.6	21,836	0.0346
0.7	25,475	0.1771
0.8	29,115	0.5016

を行った。小惑星 2007WD5 の例から、軌道決定時に考慮する観測精度の衝突確率への影響を明らかにした。

本研究では軌道決定にレーダーによる観測を考慮していないので、JPL などの決定値と比べ誤差が大きい。今後の課題としては、小惑星の軌道決定の際にレーダー観測を考慮することである。

謝辞

本研究の遂行にあたり、九州大学大学院工学研究科池田人氏には多大なる御指導と御配慮を賜りました。心から感謝いたします。

参考文献

- 1) Kawaguchi, J., Uesugi, K. and Fujiwara, A., *The MUSES-C mission for the sample and return—its technology development status and readiness.*, Acta Astronautica, vol.52, 117-123., 2003.
- 2) Chodas, P. W. and Yeomans, D. K., *Orbit determination and estimation of impact probability for Near Earth Objects*, AAS 99-002, 1999.

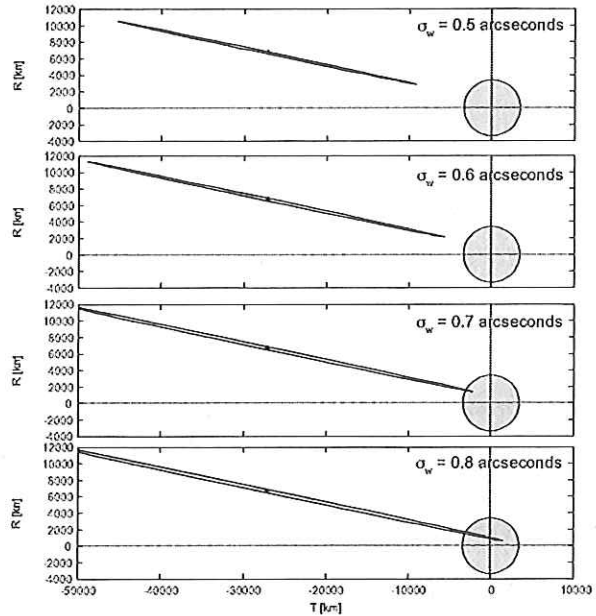


Fig. 11 観測精度と誤差楕円

- 3) Morrison, D., *The Spaceguard Survey Report of the NASA International Near-Earth-Object Detection Workshop*, NASA-TM-107979, 1992.
- 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) Byron D. T., Bob E. S. and George H. B., *Statistical Orbit Determination*, Academic Pr., 2003.
- 6) Michel, J.R., *A New Method for Accurately Calculating the Integral of the Bivariate Gaussian Distribution over an Offset Circle*, JPL Eng. Memo. 312/77-34, 1977.

(2008年3月22日受付, 2008年6月15日受理)