

隕石衝突による生物の絶滅と進化を支配する宇宙のメカニズム

京都大学名誉教授 藪下 信

我々人類が棲息する地球は、実はきわめて危険な場所であることが20世紀後半になってわかつてき。先人たちはこの地球をどのようにみなしていたのか、そしてまたそれらの危険に対処する手段を人類は持ち合はせているのか、そういうとについて、歴史的な宇宙観の変遷をたどりながら考察していきたい。

これらの知見から導かれる知見をもとに、導かれる災害はどのようなものが考えられるのか、そしてそれらの脅威の回避の手段についてどのようなものが考えられるのか、短く取り上げることにしたい。

I. 地上生物の進化に関して、二つの考え方。

1. フランスのキュビエ

生物はなにか巨大な外的衝撃によって絶滅させられた。激変説 (catastrophism)。もっとも劇的な絶滅は6500万年前におこった恐竜の絶滅で、これは白亜紀 (Cretaceous) の末におこっている。フランス側から英國にちかくと、ドーバーの白い崖 (こういう表題の映画があった) が見えてくるが、これは英國の地層が白亜紀にできたことをしめす。

2. 英国 の地質学者ライエル 漸進説

緩やかな環境変化の中で、生物進化は緩やかにおこる。チャールス ダーウィンの進化論 の影響を受ける。

20世紀に入ると、天文学の観測が次第に精密になり、太陽系の内部に微小天体 (minor bodies) と呼ばれるものが多く発見されるようになる。これらは彗星、あるいは小惑星であるが、小惑星 (隕石) は明るさがそれほどでもない。他方、彗星は明るく、見た目にも大きいので、仮に地球と衝突が起るとすれば、彗星が大異変を引き起こすであろうと考えられていた。実際ハレー彗星がちかづいたときも世界的な話題になった。当時、彗星のガスの中に猛毒のシアンの存在することがわかつてていたので、人類はその毒で全滅させられるというようなデマもあった。London ではどうすればよいかということで、バケツに水を汲んで、その中に顔をつっこんで、息を止めて彗星が通過するのを待てばよいという方法までもがまことしやかに語られた。

望遠鏡の検出性能は次第に向上し、小惑星 (隕石) が多数存在することがわかつてき。

II. 彗星と地球の衝突確率。

フランスの著名な数学者兼天文学者のラプラス (Laplace) は、彗星の地球との衝突が大惨事をもたらすと警告した。

米国の大学で広く用いられた教科書(天文学)は Princeton 大学の著名な学者ラッセル (H. N. Russell) らによるもの。その中に以下の記述がある。

「地球が地質時代に彗星と衝突したことはありそうなことである。地球軌道の内側に入

る彗星が地球と衝突する回数は4億回に一回である。毎年5個の新彗星が見つかるので、平均すると8000万年に一回、彗星は地球と衝突することになる」。

しかし、Russellらが考えていた彗星は、現在の氷の塊とは異なるものであり、大した災害は起こらないと彼らは結論つけた。彗星についてのモデルは1959年にホイップル(Fred Whipple)によって提唱された。

III. 彗星衝突と大破壊。

筆者は1964年の初夏、California大学(San Diego)にHarold Urey(ユーレイ)教授を訪ねる。ここで彗星衝突がもたらす結果について、教授の考えを色々と教わる。テクタイトについて議論したが、これは彗星と地球衝突によって作られるのではとの仮説が出されていた。



テクタイトはいろんな時代のものがあるが、多くは地質境界に対応する。

1971年の大論文

Urey教授のNature誌に発表した論文に注意。題名は、

「彗星の地球との衝突がもたらす地質学的影響」

仮定した天体。半径が10kmの彗星。

衝突速度。ハレー彗星のごとく細長い軌道を持つ天体の速度は、40km/秒。地球の公転速度は秒速30kmなので、相対速度は最大73kmになる。質量を 10^{18} グラムとすれば、衝突によって放出されるエネルギーは $(1/2)M \times v^2$ (vは速度、Mは質量であるので、)衝突のエネルギー= 2×10^{31} エルグ。

これをUreyは他のエネルギーと比較した。

1年間に太陽から受けるエネルギー= 3.5×10^{31} エルグ

マグニチュード9の地震= 2×10^{25}

すなわち、マグチュード9の地震約100万個。

大気をすべて吹き飛ばすに必要なエネルギー= 4×10^{30}

仮にすべてのエネルギーが大気の気温上昇に使われたら気温は 190°C 上昇する。

これを別の角度から計算してみる。メガトン級の水爆が放出するエネルギーは 4×10^{22} エルグである。

よって、

彗星衝突エネルギーは水爆5億個に匹敵する。

またマグニチュード9の地震（東北大地震）100万個に匹敵する。

ユーレイが用いた彗星のエネルギーの値は少し大きすぎる。直径が20kmにも及ぶ彗星は、珍しい。また相対速度も、最大可能な値を採用している。約100倍大きすぎると思えるが、巨大なエネルギーであることにちがいない。

これだけの大エネルギーが放出されるので、当然生物種の大絶滅は起こると想像される。

この論文を境に、生物の大絶滅の原因として、天体衝突が単なる可能性から、現実性の高い仮説として取り上げられることになる。

ユーレイが用いた地質境界とクレーター（そのまま）

地質時代	境界年代（万年）	クレーター	直径
	36	ポピガイ	100km
始新世			
	58	カラ	
堺新世			
	63（恐竜絶滅）		?
白亜紀			
	135?		
ジュラ紀			
	181	プシエンズ カツンキ	180km
三疊紀			
		マニクーガン（カナダ）	70km
二疊紀			
	280		
石炭紀			
	345	シリアン（スエーデン）	52km

このような地質学的考察から、「地質時代の境界が巨大彗星の衝突によってもたらされたとする仮説を実証することは、おそらくはそれがもたらす科学的知識が正当化するよりも、はるかに高価につくことは、誰もが認めるだろう」とユーレイは論文をむすんでいる。

この論文にも触発されて、筆者は「彗星と生命」と題する本を1980年に工作舎から出版している。

落下隕石の温度

直径 m	速度 km/秒	絶対温度 K
1	5	7000
10	5	7000
10	11	16500
10	30	70000

100	30	70000
-----	----	-------



マニクアガンクレーター カナダ



バリンジャー クレーター アメリカ

白亜紀末の大変動

恐竜の絶滅

巨大昆虫の絶滅

巨大貝類（アンモナイト）の絶滅

哺乳類は生き延び、現在では全盛を極める。これらは巨大な彗星、もしくは隕石（小惑星）の衝突の結果なのか？

IV 地質学的証拠を見つけ出す

ユーレイの仮説はきわめて単純な論理に基づいている。エネルギー保存則という、もつとも基礎がしっかりした法則のため、論破のしようがない、研究者らは次第に真剣にその証拠を見つけようといろいろと試みる。そして大発見をしたのが California 大学 (Berkeley 校) の4人の学者でリーダーはすでにノーベル物理賞を得ていたルイ アルバレズ。彼は何をしたのか。

息子の Walter は地質学者で、白亜紀第三紀境界（恐竜絶滅）の地層（粘土）がイタリアのグッビオでむき出しになっていることを知り、そこで資料を収集し、持ち帰り、その資料がどのような元素を含んでいるかを測定した。

実はこれは厄介な実験で、これには「中性子放射化法」をもちるが、これを使える立場にいる研究者は多くない。

鍵となる元素は イリジウム 記号は Ir。ペン先に使われているという。

イリジウムは化学的な手法では取り出せないので、それに中性子をあてて、放射性を持たせ、出てくる放射線のエネルギーを測定して、存在する量を測定する。実は測定に必要な計測器が、あちこちにあるものでないために、測定は難しい。Alvarez らは California 大学に所属しており、其処には原子炉と、その測定装置があったことが、有利に働いた。

なぜ Ir に注目するのか。地球は形成されたときは高温で、溶けた状態にあった。このため重い元素である Ir は、次第に内部へとしづんでいくので、地表にはわずかしか存在しない。他方隕石は、あるいは、宇宙の塵に含まれる金属類は、こういうことがないために、地球表面の岩石よりも、多く含まれる。Alvarez らは、その論文の中で、直径が 10km の巨大隕石（小惑星）が衝突し、その際含まれた Ir が地球上にばらまかれたのだろうと推論した。結果的に、その後の調査や分析で、これが最も有力な原因だと考えられるに至っている。Alvarez ら以外にも、Smit Hertogen は、隕石衝突説を提唱した。

衝突の証拠となる巨大クレーターはどこにあるのか。納得していない地質学者らは、強く反論した。さらに古生物学者らも反論した。これを揶揄して、死体なき殺人事件ではないか。

とすらいわれるに至った。こうして、いくつかの仮説がでてくるのである

火山噴火説 Officer。 インドのデカン高原はほぼ同じ時期にできているが、巨大な量のマグマでできている、時代は異なるが、シベリアの溶岩の量も、とてつもなく多い。

巨大分子雲突入説。Yabushita&Allen .

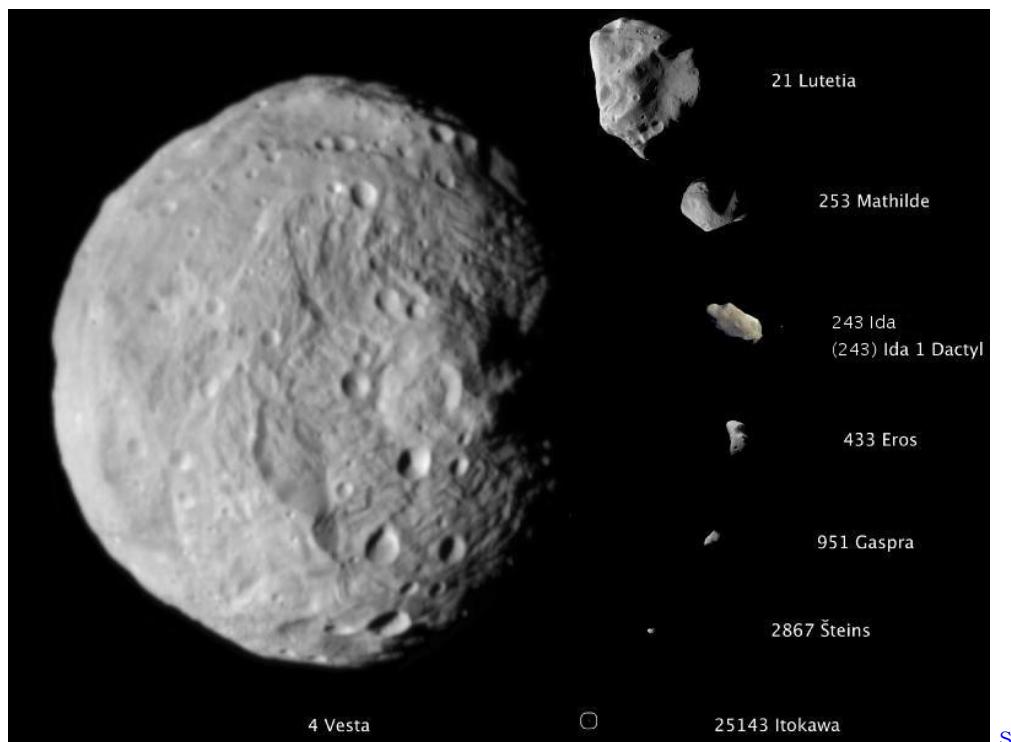
太陽系が、銀河内にある巨大分子雲に突入し、地球は酸欠状態になったので、呼吸器が発達していない恐竜や、巨大昆虫（気門の列）は絶滅した。

毒草の繁茂説

あれやこれやと議論はあったが、最終的にメキシコのユカタン半島にクレーターがあることが判明し、今ではこのクレーターが、巨大な虫類を絶滅においこんだ隕石の衝突の痕跡とみなされている。直径については、少し意見が分かれる。180 km。

Shoemaker-Levy 彗星は、木星に衝突する際に、いくつもに分裂した。ユカタン半島にぶつかったのも、このようなもののひとつである可能性がたかい。同時期のいくつかのクレーターが見つかっている。





イリジウムを含む地層はその後、あちこちで調査されているが、太平洋の海底（ハワイ諸島の西）のボウリングで得られた堆積物からも得られている。これを見ると、6500万年前の地層で、その密度が高くなっているのがきれいにでてくる。その後、Irの分布は世界的であることがわかつてきた。

Alvarez はアメリカ科学アカデミーで講演しているが、その表題および、発表された文献は以下の通り。

Proc. Natl. Acad. Sci. USA

Vol. 80, pp. 627-642, January 1983

Geology

Experimental evidence that an asteroid impact led to the extinction of many species 65 million years ago (小惑星衝突が、6500万年前に多くの種の絶滅を導いたことの実験的証拠)。

Luis W. ALVAREZ (レイ アルバレズ)

Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California 94720

Contributed by Luis W. Alvarez, October 12, 1982

V. 恐竜絶滅のメカニズム

提唱されているメカニズムはおおよそ次のようなものである。

1. 爆風、強烈な地震、などのショック。
2. 隕石衝突によって巨大なクレーターができる。吹き飛ばされた岩石は地球上のあちこちに飛ばされるがこれらは高温のため、地上に火災をもたらす。火災で発生した煤などは上空に滞留し太陽を遮る。
3. 大気圏上空の飛ばされたチリは大気圏上空に滞留し、太陽光をさえぎり、植物が枯れ、動物が死にたえ、食物連鎖の頂点にいた恐竜も死に絶えた。
4. 巨大津波が世界の海岸におよせ、浅い海に生息していた多くの魚類や、貝類は死に絶えた。アンモナイトはその例である。もちろん、太陽光が遮られ、海水中の植物やプランクトンも死滅。海は死のうみとなる。

衝突の頻度と破壊の規模

小惑星にしろ、彗星にしろ、大きいものほど数は少ない。他方小さいものは無数といつていいほどある。すなわち、大災害をもたらすものは衝突の頻度は小さいが、起った時の災害は、想定外と云つていいほどのものである。これは数学的にいえばフラクタルと呼ばれるもので、地震も同じような性質を持つ。

したがって、衝突の頻度といつても、どのような大きさのものを考えるかによって頻度は異なる。おおよその目安として、以下のことがいえる。

1. 生物種の大絶滅を引き起こすようなもの。数千万年に一度。
2. 人類の文明を消滅させる程のもの。直径は1.5km、これは50万年に一度位は起こる。Chapman と Morrison (NASAの宇宙部門の責任者) の推定。

3. 大津波を引き起こす可能性のあるもの。直径200メートル。
これが地球と衝突する確率は1世紀につき、2.2%位と推定される。別の表現をすれば、
4500年に一度位である。

VI. 津波の脅威

小惑星、あるいは彗星の衝突は起こるのは、小さいものの破壊は局地的である。たとえば、2013年2月15日ロシヤ・シベリアのツングース地方で起こった彗星の衝突による爆発。この場合、日本では何も異変は観測されていない。この程度の衝突は、2、3世紀に一度は起こりうる。

しかし、小惑星あるいは彗星が仮に太平洋に落下した場合はどうなるか。津波を介して、太平洋の周辺にある大都市などは大きな被害を受けるのは間違いない

ON THE POSSIBLE HAZARD ON THE MAJOR CITIES CAUSED BY ASTEROID IMPACT IN THE PACIFIC OCEAN

「太平洋に落下する小惑星によって大都市に引き起こされる災害について」
基礎式として J. G. Hills によるものを用いる。

$$h_w = 7.8 \text{ m} \times \left(\frac{1000 \text{ km}}{r} \right) \left[\left(\frac{d}{200 \text{ m}} \right)^3 \left(\frac{V}{20 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{\rho}{3 \text{ g cm}^{-3}} \right) \right]^{0.54}$$

r 爆心からの距離
d 小惑星の直径
rho (ロー) 密度

太平洋のいろんなところが爆心となったと仮定して、上の式に表れる量
(2000 km/r) の平均値を計算によって求めた。その結果が次の表である。

TABLE I
Average value of 1000 km/r

	Latitude	Longitude	Average of 1000 km/r	Stan. dev.
Japan	34°39' N	135° E	0.200	0.145
Taiwan	23° N	121° E	0.181	0.167
Shanghai	31°13' N	121°25' E	0.190	0.263
Hawai (Honolulu)	21°19' N	157°50' W	0.272	0.609

この表で得られた平均値をもとに、津波の高さを推定する。

TABLE II

Average tsunami height expected from
an impact in the Pacific, by an asteroid
with $d = 200$ m

	Runup factor		
	10	25	40
Japan	16 m	39 m	62 m
Taiwan	14	35	56
Shanghai	15	37	59
Hawaii	21	53	84
San Diego	15	37	59

ここで、Runup factor とは駆け上がり因子といわれるもので、津波の高さは、陸地に近づくにつれて高くなることを指す。この因子は海岸線近くの形状によって大ききことなる。駆け上がり因子は、日本では、平均で10位であるが、ハワイでは40となることも多い。ここでは直径200mの小惑星衝突を想定している。

チリで起こった大地震による津波が日本沿岸に到達には22時間かかっている。したがって。衝突が確認されれば、そこから津波到達の時間は推定できる。

津波に耐える建物 の種類 (首藤)

木造家屋	2 m
石作り (煉瓦を含む)	7 m
コンクリート 建造物	20 m

VII 経済的損失

ポルトガルの首都リスボンは、かつて(1755年)巨大な津波によって破壊されたが、その時約20万人の内、3万人が生命を失い、85%の建物が破壊された。経済的損失は巨額であったといわれている。これを計算するのは、難しい。しかし、大まかな計算はできる。

東京湾に津波が押し寄せるとする。太平洋の南部が爆心であれば、波は南から侵入する。沿岸50kmに沿って、2kmの内部までもが水没すれば、計100平方kmの損害となる。この地域には製油所、発電所、石油タンク、空港など、重要設備が多くある。

おおよその 数字を得るために、仮に1平方mあたりの損失を100万円とすれば、損失額=100兆円

という数字が出てくる。

それのみでなく、東京の主要機能は海からきわめて近いところにあり、これらが水没すれば、今ではcomputer の機能なども集中しているから、大変な損失と混乱が出る。

しかも損害は実施には太平洋沿岸全体におよぶ。国家の安全を守るためにも、それ相応の研究費と調査費を政府は支出すべきではないか。

地震と違う点は、地震は予知が難しいが、小惑星はそれなりの望遠鏡があれば検出できる。しかも、軌道計算はきわめて正確に行えるので、衝突を予告することは難しくない。後で触れるが、軌道を変更することも可能である。

VIII. 未解決の問題

1. 2億5000万年前の絶滅。

これは恐竜絶滅期（6500万年前）の生物絶滅よりも、規模はさらに大きい。95%の生物種が絶滅している。これといった大きなクレーターは見つかっていない。

岐阜市金華山公園で、黒い地層がむき出しになっている。

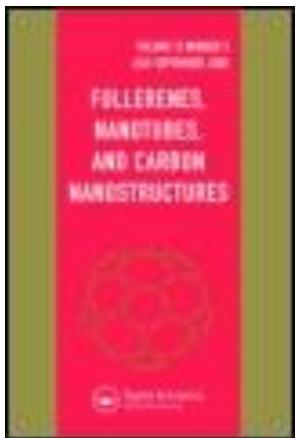
名古屋大学 group はこの黒い物質がフラーレンと呼ばれる炭素原子だけからなる鳥かご状の物質であることを示した。これが宇宙に存在するということもわかっている。

それで、これを岐阜大学の専門家との協力で採取し、日本原子力研究所の原子炉で放射化し、イリジウムが含まれるかを専門家によって測定してもらった。結果はネガティブであった。すなわち、地球外からの落下物が原因とは考えられない。中国などにも同時代の地層があり、アメリカの研究者が測定したが、同じ結論を得ている。

とすれば、大絶滅の原因はなにか。2億5000万年前に起った火山噴火（シベリア）なのか。

Measurement of Iridium in the Fullerene - Rich Layer in Central Japan
by the Neutron Activation Method

Shin Yabushita and Shin-ichi Kawakami .



Abstract

Measurement has been made of Ir content in samples collected from lower Triassic layer in Gifu, central Japan, rich in fullerenes, in order to investigate if they are correlated with extraterrestrial events. The coincidence gamma ray measurement method has been applied to the samples after they had been activated by a research reactor at Japan Atomic Energy Research Institute and had been cooled for 2 months. The samples analyzed yielded Ir content at several ppt's, far less than those of the K/T boundary layers, for which Ir content of a few ppb's has been obtained. In view of other experiments that yielded negative results, it is concluded that the fullerenes are not to be taken as evidence of extraterrestrial events.

2. 白亜紀末の絶滅。絶滅したのは特殊な生物種である。

恐竜は巨大爬虫類であるが、小型の爬虫類は生き残った。大型昆虫も絶滅したが、小型は生き残った、そして、その後の大繁殖したのは哺乳類、すなはち人類の祖先であり、現在棲息している大型生物はすべて哺乳類。

Did an impact alone kill the dinosaurs? in
Astronomy and Geophysics by Shin Yabushita and Anthony J Allen
1997.

さらに、白亜紀末の地球全地質境界のイリジウムの量を計算し、それがクレーターの大きさから推定される衝突体がもたらしたイリジウムの量と整合性があるかを検討する

と、かなりの差が出てくる。地層に含まれる Ir の量がはるかに多い。クレーターの大きさについては、いまだに議論の余地がある。

3. 全地球凍結。

地球そのものが凍結し、氷で覆われていた時代があったことがわかっている。このような状態はどのようにしてたらされたのか。単に小惑星の衝突で、引き起こされるのか。

VII. 地球衝突天体をいかに避けることができるか。

いろいろな手段が考えられるが、一つの方法は小惑星表面において爆発を起こし、クレーターを作ることではないか。そうすると、クレーターの穴になる部分が破片となって飛び出し、小惑星に反対方向の力を及ぼし、そのことによって惑星の進行方向、あるいは速度をえることになって、地球との衝突を避けることができる。クレーターを作る方法の一つとして、核爆発を利用する手段がある。これが政治的に許容されるか否かは、別のもんかいとし、一応の効果を評価する。

どの程度の破壊力を必要とするかを考えてみると、それはおよそ次のようにできる。爆発のエネルギーのどれだけの部分が表面に吸収されるか、そしてそのエネルギーでどれだけのクレーターが作られどれだけの力が作用するか、の二つの部分に分けられる。以下に示すのは、その計算の一例である。

Mon. Not. R. Astron. Soc. 296, 662–668 (1998)

On the transfer of radiation at asteroidal surfaces in relation to their orbit deflection – I

S. Yabushita

Department of Applied Mathematics and Physics, Kyoto University, Kyoto 606, Japan

Accepted 1997 December 19. Received 1997 December 11; in original form 1997 April 2

ABSTRACT

One of the methods discussed in deflecting the orbit of an Earth-colliding asteroid is the use of nuclear explosives. In assessing its feasibility, apart from political considerations, it is important to quantify how effective it is in orbit deflection. The transfer of radiation incident at the surface is governed by a non-linear diffusion equation. For low-yield explosions with a slab geometry ($S_0 \approx 10^8 \text{ kJ } \mu\text{s}^{-1}$), the temperature at depth x and time t is well approximated by a similarity solution of the form $T(x, t) = T_0 f(\xi)$, $\xi = x/(T_0 t)^{1/2}$, with T_0 given by $(S_0/\sigma)^{1/4}$, where σ is the Stefan–Boltzmann constant, n is an index that specifies the radiation transfer and $f(\xi)$ is the solution of a non-linear differential equation subject to the condition $f(0) = 1$ and $\lim_{\xi \rightarrow \infty} f(\xi) = 0$. For high-yield explosions ($S_0 \approx 10^{10} \text{ kJ } \mu\text{s}^{-1}$), numerical solutions to the non-linear diffusion equation can be obtained. These solutions have properties similar to the case of low-yield explosions. If the duration of the explosion is $d \times 10^{-8} \text{ s}$, where d is close to 3, the fraction of energy absorbed by the surface is found to be 7, 12 and 23 per cent for $S_0 = 10^8, 10^9$ and $10^{10} \text{ kJ } \mu\text{s}^{-1}$ respectively.

Key words: radiative transfer – minor planets, asteroids.

1 INTRODUCTION

Thanks to the researches made by physicists, geologists and astronomers over the past two decades, it has become clear that our own Earth has been subjected to catastrophic impacts by comets and asteroids. Direct evidence of the impact at Chicxulub, Mexico dated at 64.98 Myr BP is the best known (Grieve 1997). Such impacts may trigger worldwide mass extinctions of fauna and are estimated to occur once every ten million years or so. On the other hand, smaller impacts occur more frequently. For instance, an impact resulting from an asteroid with diameter (D) greater than 1.5 km takes place, on average, once every half a million years. Although less catastrophic than the one at Chicxulub, it is still sufficiently destructive to plunge the Earth into a primitive society. For a review of frequency of impacts, see Chapman & Morrison (1994). Even a smaller impact with D close to 200 m in one of the oceans could destroy the cities and nations lying at the peripheries and could drastically damage economies (Yabushita & Hatta 1994). Hence, it is important to discuss how such hazards could be avoided.

One of the hazard mitigation methods frequently discussed is the use of nuclear explosives near or below the surface of the minor bodies on collision course with the Earth. For instance, by heating the surface to a high temperature by such an explosion, part of the material is blown away from the surface; this gives rise to a recoil, which imparts momentum to the impacting body, and hence a collision may be avoided. For other mechanisms such as mass drivers, see Ahrens & Harris (1992) and Melosh, Nemchinov & Zetzer (1994).

In assessing the usefulness of such a method, it is important to estimate what fraction of the energy involved in the explosion could be converted into energy of the material to be blown away. Clearly it depends upon how much energy is absorbed by the surface of the minor body. This process is usually referred to as radiation coupling. If this coupling were very small, one would need to explore other methods that were more efficient. The object of the present paper is to investigate theoretically the efficiency of the explosion. This problem has been tackled by Simonenko et al. (1994), adopting an approximate approach. Here we show that an exact treatment is possible with relative ease.

© 1998 RAS

© Royal Astronomical Society • Provided by the NASA Astrophysics Data System

表面に吸収されるエネルギーの割合は、おおむね 5 %である。
次に、そのエネルギーでどれだけのクレーターができるかを計算する。

6 RECOIL RESULTING FROM HIGH PRESSURE IN THE HEATED REGION

The object of the present section is to point out a factor that has not been recognized in earlier investigations. This factor is the momentum endowed to the asteroid as a result of high pressure in the heated region. It will be shown that the momentum may not be too small to be neglected.

When the surface is heated by the radiation, the temperature profile is of the form shown in fig. 2 of Yabushita (1998). Depending on the radiation flux at the surface, the duration of irradiation of $0.03 \mu\text{s}$ corresponds to a dimensionless time of 30, 63 and 133 for $S_0 = 10^{10}, 10^9$ and $10^8 \text{ kJ cm}^{-2} \mu\text{s}^{-1}$ respectively. The heated region penetrates to 2.0–5.0 characteristic lengths for $S_0 = 10^{10}$ and $10^8 \text{ kJ cm}^{-2} \mu\text{s}^{-1}$ respectively during these times. This corresponds to 60 and 1 cm respectively. On the other hand, the temperature for $S_0 = 10^{10} \text{ kJ cm}^{-2} \mu\text{s}^{-1}$ is typically $3.6 \times 10^7 \text{ K}$. The velocity of sound, c_s , is given by $c_s^2 = (\gamma - 1)C_p T = (\gamma - 1)\epsilon$, where ϵ is the heat function, and $\gamma = C_p/C_v$, where C_p and C_v are the specific heats at constant pressure and constant volume, respectively. For aluminium, $C_v = 7.9 \times 10^6 \text{ kJ g}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ so that $c_s = 2.9 \times 10^7 \text{ cm s}^{-1}$ for $T = 3.6 \times 10^7 \text{ K}$. The pressure, p_s , is simply $c_s^2 \rho / \gamma$, which equals $3.7 \times 10^{14} \text{ N m}^{-2}$ for $T = 3.6 \times 10^7 \text{ K}$ and $\rho = 2700 \text{ kg m}^{-3}$ (aluminium).

Once the irradiation is over, the heated region begins to expand. The velocity of the expansion into vacuum cannot exceed the value $2c_0/(\gamma - 1)$, where c_0 is the velocity of sound in the reservoir (Landau & Lifshitz 1963, p. 357). We may put $c_s \approx c_0$, so that the high pressure persists for the time $\tau \approx \ell[2c_s/(\gamma - 1)]^{-1}$. For $\ell = 60 \text{ cm}$, $\tau \approx 10^{-6} \text{ s}$. Thus, the asteroid receives a momentum $p \times \tau \times S_R$ where S_R is the irradiated surface area. This equals $3.7 \times 10^{10} (S_R/100 \text{ m}^2) \text{ g cm s}^{-1}$. This may be compared with the recoil momentum resulting from the ejection of mass estimated in Section 5 for the case of an explosion with $W = 100 \text{ kton}$. If S_R is 22 m^2 , the two become equal in magnitude. This means that the recoil momentum consists of two mechanisms, namely the momentum of the ejected mass and the expansion of the heated region.

7 DEFLECTION OF A LARGE ASTEROID ($d = 10 \text{ km}$)

Although the case of a large asteroid is basically the same as the case of a small one, we consider it in order to gain a concrete picture of the process.

Table 2. Recoil velocity resulting from a nuclear explosion of energy E . An efficiency of 5 per cent is adopted. Density = 2200 kg m^{-3} . M_a is the mass of an asteroid with diameter d and M_{ej} is the mass of the ejected material.

Case A. Energy–crater diameter scaling law depends on g .					
d	M_a	E	M_{ej}	Δv	
100 m	$1.15 \times 10^9 \text{ kg}$	100 ton	$8.3 \times 10^8 \text{ kg}$	53 cm s^{-1}	
1 km	$1.15 \times 10^{12} \text{ kg}$	100 kton	$1.2 \times 10^{10} \text{ kg}$	0.71	
10 km	$1.15 \times 10^{15} \text{ kg}$	1 Gton	$1.8 \times 10^{13} \text{ kg}$	1.1	

Case B. Energy–crater diameter scaling law independent of g .					
d	M_a	E	M_{ej}	Δv	
100 m	$1.15 \times 10^9 \text{ kg}$	1 kton	$5.2 \times 10^6 \text{ kg}$	0.33 cm s^{-1}	
1 km	$1.15 \times 10^{12} \text{ kg}$	1 Mton	$2.3 \times 10^9 \text{ kg}$	0.15	
10 km	$1.15 \times 10^{15} \text{ kg}$	1 Gton	$1.0 \times 10^{12} \text{ kg}$	0.064	

Consider an asteroid with diameter (d) close to 10 km and energy of explosion W close to 10^6 kton ($= 1 \text{ Gton}$).

The surface gravity, g , is written as

$$g = 0.307 \times 10^{-2} \left[\frac{d(\text{km})}{10} \right] \text{ m s}^{-2}$$

or

$$g = g_0 \left[\frac{d(\text{km})}{10} \right] / 3192,$$

where g_0 is the gravity at the Earth's surface. Then we have

$$D_c = 2.57 \left[\frac{d(\text{km})}{10} \right]^{-0.117} \times 0.0133 W^{1/3.4}$$

$$= 0.0342 \left[\frac{d(\text{km})}{10} \right]^{-0.117} W^{1/3.4}.$$

For a 1-Gton explosion with an absorption efficiency of 0.05, $W = 2.1 \times 10^{17} \text{ J}$, so that

$$D_c = 4250 \left[\frac{d(\text{km})}{10} \right]^{-0.117} \left[\frac{\epsilon E}{0.05 \times 1 \text{ Gton}} \right]^{1/3.4} \text{ m},$$

where E is the energy yield of the explosion and ϵ is the fraction of the energy absorbed by the asteroid. The ejected mass, M_{ej} , is then given by

$$M_{ej} = 1.76 \times 10^{13} \left[\frac{d(\text{km})}{10} \right]^{-0.351} \left(\frac{\epsilon E}{0.05 \times 1 \text{ Gton}} \right)^{3/3.4} \text{ kg}.$$

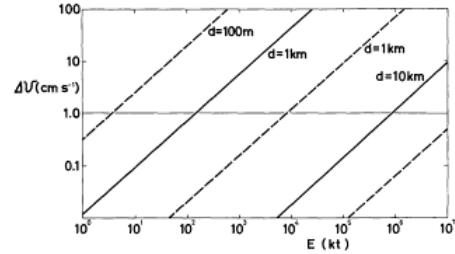


Figure 1. The recoil velocity is plotted against the energy of the explosion. The solid lines correspond to the case where the energy–crater diameter relation depends on surface gravity. The dotted lines correspond to the gravity-independent case.

ここで、少し問題がおこる。それは、爆発のエネルギーとクレーターの大きさを表す関係式に不確実性があることに由来する。小さなクレーターであれば、実験で確かめられるが、大きいエネルギーではそれが難しい。今一つの問題は、地上の実験では、重力が作用しているが、宇宙空間では重力は弱いので、これがどういう効果を及ぼすのかが定かでない。しかし、一例として、クレーターとエネルギーの関係が 重力と関係するとする公式を使えば、以下の結果が導かれる。

直径	惑星質量kg	エネルギー	爆発質量kg	速度
d	M	E	M e	$d v$
100 m	1.15×10^9	100 t	8.3×10^8	53 cm/秒
1 km	1.15×10^{12}	100 kt	1.2×10^{10}	0.27 cm/秒
10 km	1.15×10^{15}	1 Gton	1.8×10^{13}	1.1 cm/秒

要するに、10 km 級の小惑星であれば、秒速1 cm余りを変更させるのに。ギガトン級の爆発が必要になる・これだけの速度変化で衝突を避けるには、衝突のはるか前に発見し、対応しなければならない。

次の図は、小惑星に速度変化を与えたときに。元の軌道からどれだけの変化が起こるかを計算したもの。

これから何を読み取れるのか。最短距離は時間とともに大きくなる。できるだけ早く衝突天体を発見し、軌道変更をおこなう。このことに尽きるのではないか

速度変化を与える最も効率的なところは、近日点においてであると思われる。そしてその速度 $d v$ の近似値は以下の式で (Ahrens & Harris) 評価される。

$d v = 0.7 (10/t) \text{ cm/sec}$
t: リード タイム(年)
著者らによる評価もおおむねこれに近い。

核爆発以外に、小惑星軌道上に大量のちりをまいて、それが惑星にくつつくことにより速度をへんこうするとか、いろんなアイデアがだされている。活発な議論が出てくることが望まれる。

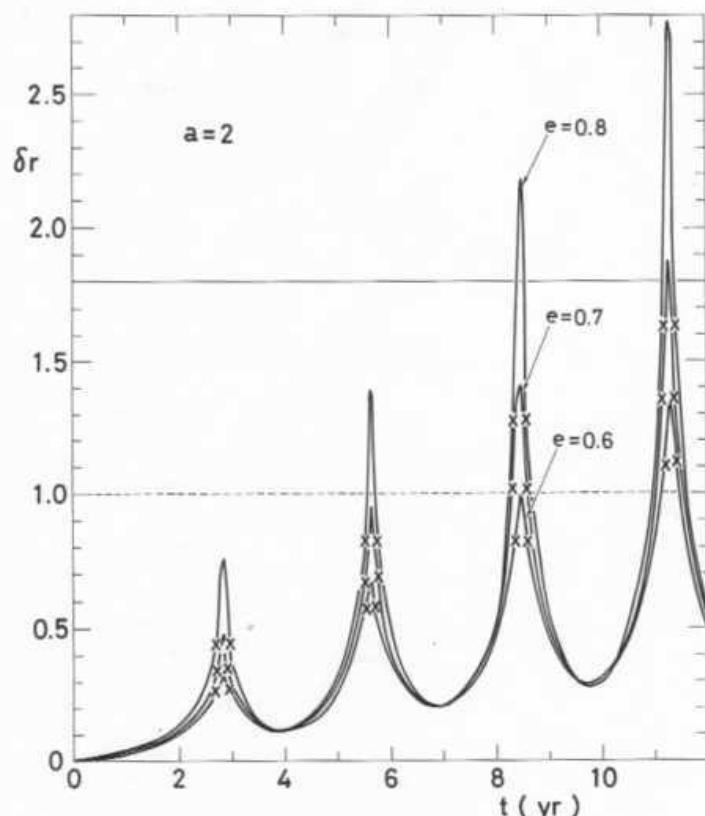


Fig. 1

The separation δr between the original and the perturbed orbits is plotted against time. δr is given in units of the earth radius and the time is in years. The velocity change given at perihelion is 0.20 cm/sec.

横軸は時間(年)。縦軸は二つの軌道の間の距離。距離の単位は地球半径。初期速度は0.2 cm/secを仮定。aは軌道半径(天文単位)