

K/T-Impact による津波の発生

藤 本 浩 介*・今 村 文 彦**

1. はじめに

過去 200 年間の津波の発生原因を調べると 90%程度は地震であり、火山・地滑りによるものの頻度は低下する(今村, 1996)。隕石による津波はさらに希であるが、他の原因による津波規模をはるかに上回る規模の津波の発生する可能性がある。この代表例が、6,500 万年前の K/T-Impact とされる隕石衝突の際に発生した津波であり、この隕石衝突は恐竜を含めた生命体の絶滅とも関連して盛んに議論されている(Chapman & Morrison, 1994)。現在まで、隕石による津波に関する研究はなく、当時の津波規模は全く未知のまま残されている。そこで、本研究は、今まで蓄積された隕石衝突に関するデータを基に津波の発生機構をモデル化し、地球全域に及ぼす影響を評価できるモデルを作成することを目的とする。

2. K/T-Impact の規模と衝突位置

白亜紀層と第三紀層の境界にある地層は K/T 境界層と呼ばれるイリジウムを大量に含むものであり、この原因

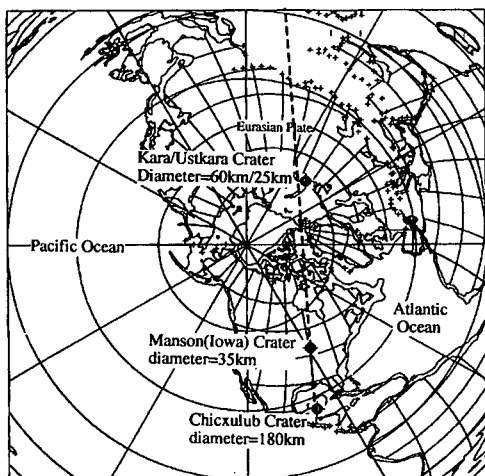


図-1 推定される K/T-Asteroid の軌跡

となった隕石は K/T-Asteroid, その衝突は K/T-Impact と呼ばれる。これによって生じたクレーターは、現在 3 箇所において 4 つ確認されており図-1 に示す正積方位図にプロットすると一直線上に並ぶ。これは隕石の突入経路を示唆しており、最大の隕石がユカタン半島 Chicxulub に落下している。この隕石によるクレータのサイズは直径は約 180 km 深さは約 7.4 km であったと推測されている。この規模は地球上で最大級のものであり、本研究ではこの隕石のみを扱う。なぜなら、図-1 に示すように他の 2 箇所は当時の陸上に落下した可能性もある。また、Chicxulub 隕石の位置は、図-2 に示すように現在は半分陸上にあるが、当時は海域であったと推定されているからである。従って、津波が発生した可能性が高く、実際、図-2 中の黒丸印にあるように、当時の沿岸に津波による数 m に及ぶ堆積層も見つかっている(Smitら, 1996; Bourgeoisら, 1988)。

3. 当時の地形の再現方法

6,500 万年前の津波伝播を数値計算するためには、当時の地形を再現しなければならない。地球上の地形はプレートテクトニクス理論により移動していると考えられているので、現在の大陸位置から当時のものへ移動する必要がある。しかも、その形状も歪んでいる可能性がある。Smithら(1981)は様々な

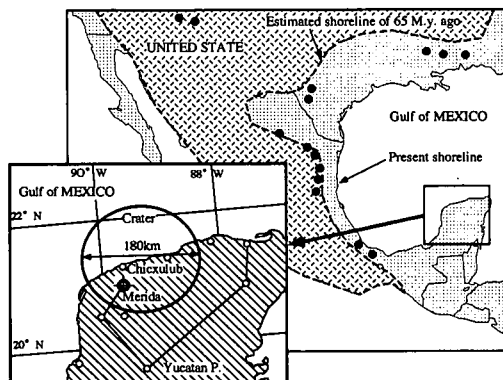


図-2 Chicxulub と発見された津波堆積物の位置

* 住宅都市整備公団(元東北大学卒論生)

** 正会員 東北大学助教授 工学部災害制御研究センター

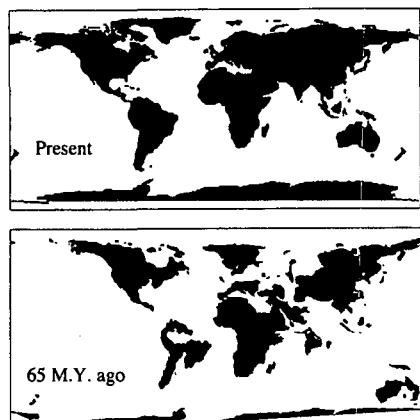


図-3 現在と6,500万年前の大陸位置

古地磁気・地質条件やテクトニクス理論より非常に古い年代の大陸の位置を推定している。また、メキシコ湾周辺においては、Ross & Scotese (1988) が詳細なテクトニクスを研究している。そこで、これらの推定位置データを元に、各大陸ごとに当時からの移動量を算出し、現在の全地球データ(図-3上)を座標変換して、図-3下に示す地形データを作成した。なお、大西洋中央海嶺などは、発散境界として位置の移動はないものとしている。また、当時の平均海面は現在より200 m程高かったと推定されているため(Haqら, 1981), 平均水位を上げている。地形データは、海域及び陸域ともに地球座標系で表示し、20分の格子間隔で分割した。

4. 推定される津波の発生過程

直径10 kmの隕石は推定速度30 km/sで海域に突入し、海底の岩盤を突き破った後に爆発し、その後に巨大なクレータを残したと考えられている。従って、隕石の衝突時とクレータ形成直後に、津波は発生したものと予想される。

現在まで、隕石衝突・爆発の過程を的確にシミュレーションできるモデルが存在しないため、ここでは2つの過程に分けて水面の変動(津波発生)を推定した。双方ともNavier-Stokes方程式を支配モデルとするマーカー粒子法(以下MAC法)を用いており、長波近似を用いていない(倉吉ら, 1997)。計算条件は表-1を参照。計算結果の一例として、直径10 kmの隕石が時速30 kmの速度で水表面への突入により発生した波動(図-4)、と直径180 km、深さ7.4 kmのクレータへ海水(平均水深4,000 m)が流入することで生じた波動(図-5)の例を示す。双方とも軸対象を仮定しており、図-5では右端がクレータの中心に相当している。

図-4によれば、隕石突入時に巨大な水柱が生じ、その

高さは20 kmにも及んでいることが分かる。その間はわずか1秒あまりである。その後、この水柱は左右に少し広がりながら落下する。一方、図-5のクレータへ流入の際には、まず水面の低下が周辺部へ伝播しクレータが海水で一杯に成った後に、正の水面変動が周辺へ伝わるよ

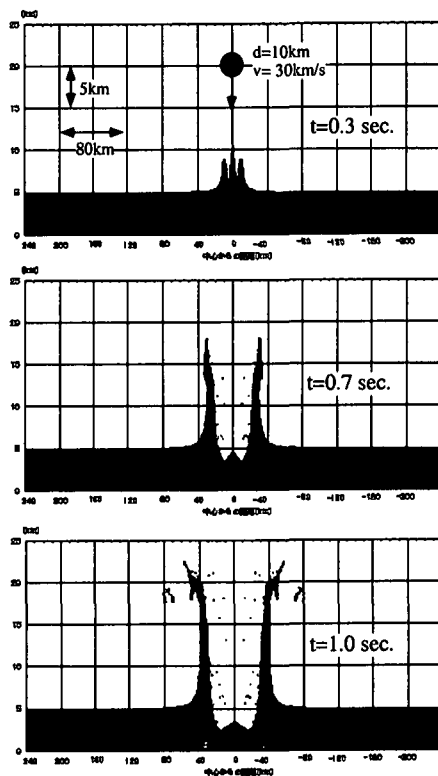


図-4 隕石突入による波動の発生

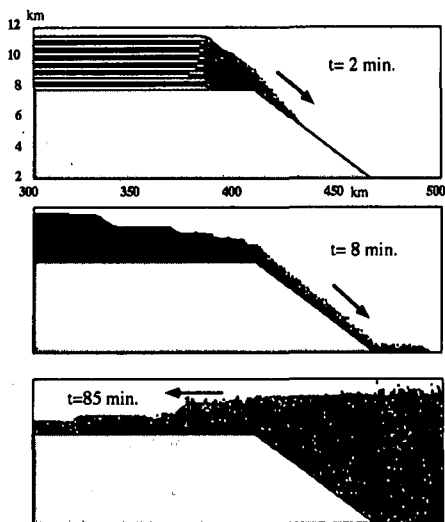


図-5 クレータに突入する海水

表-1 MAC法の計算条件

基礎方程式	Navier-Stokes 方程式
海底条件	Non-slip
格子間隔	500 m
計算サイズ	500 メッシュ×40 メッシュ
時間ステップ	各時間ステップ毎に CFL 条件を満足するように選定
再現時間	1.7 時間

うになる。クレータ周辺部においても(横軸 300 km 程度の地点), 水位の低下は 3,000 m 近くあり, 引き続き正の水位も 600 m にも及ぶ。

最近の研究によれば(松井, 1997), 隕石衝突時には, 海水はもとより隕石さえも衝突時に発生した高温のために蒸発化したと予想されている。従って, 隕石と共に天空へと吹き上げられた際には, 海水自体も消滅していたと考えられる。そこで, クレータへの流入による波動発生成分のみを抽出し, 外洋伝播プログラムのクレータ付近での初期・境界条件として適用する。図-6(軸対象を仮定した1次元伝播)には, クレータ周辺部での(中心部から 180 km の地点)水位の時間変化を示している。境界条件として与えられた水位は, 図-6の結果に同心円上での連続関係を考慮して水位を補正している。

5. 外洋伝播方法及び結果

津波が外洋へ伝播過程は, 地球座標系を用いた線形長波理論による数値モデルにより再現した。なお, クレータ付近では波高が非常に大きくなると予想されるため線形近似の適用は難しいと思われるが, ある程度離れた場所においてはその問題は少なくなると考える。本数値モデルは, 1960 年チリ津波に適用した Imamura & Shuto (1989) モデルを全地球対象のモデルに拡張したものである。領域の左右では水位(流量でもよい)を連続させ, さらに, 南北極では流量の連続条件が満足されるように設定している。ただし, これでは極を通過する波動の方向性を再現することは難しく今後の課題である。表-2

表-2 津波伝播モデルの条件

基礎方程式	地球座標系の線形長波理論
格子サイズ	20 分
時間ステップ	各ステップ毎に CFL 条件を満足するように選定
再現時間	22 時間

に計算条件を示す。

図-7には, 外洋伝播計算結果の一例として, 1時間毎の伝播図を示す。当時, 南北アメリカ大陸が地続きでなかったため, そこから津波は太平洋に放出することが可能であった。太平洋を通過した津波は 22 時間後には日本へ到達している。

次に, 最高水位分布を図-8に示す。このより水位 100 m を越える部分はメキシコ湾岸全域(特に北部)に限定されていることが分かる。また, 比較的水位の高い部分は大西洋にとどまることも示され, 一方, 中米を通過した津波は容易に太平洋を伝播していくが, 波高はかなり小さいことがわかった。なお, 本計算は 22 時間の再現計算であるため津波は未だ進行過程であり, 太平洋側ではさらに計算を進めると大きい波高が現れると予想されるが, その規模は同規模(10 m 程度)であると考えられる。図-1に示された津波堆積物が発見された場所は, 再現された最高水位が 200-600 m の場所であり, 予想以上の大きい津波が来襲した場所であることが分かる。

さらに, 主な 6 箇所における水位時系列の結果を図-9に示す。クレータ形成時には, 第一波は引きで始まったが, 周辺の水深が浅いために大きな水位低下が見られず伝播途中で消え, 引き続き押しの成分が顕著になっていくことが分かる。これは kawamata ら (1993) による 1883 年 Krakatau 火山性津波の再現にも見られた結果である。各地点の主な周期は 2 時間であり, 1960 年チリ津波の 2 倍になる。メキシコ湾の他に, 南米北部の地点でも 150 m を越える波高の津波が確認できる。この地点での津波堆積物は確認されていないが, メキシコ湾沿岸と同様に, 存在する可能性は高い。

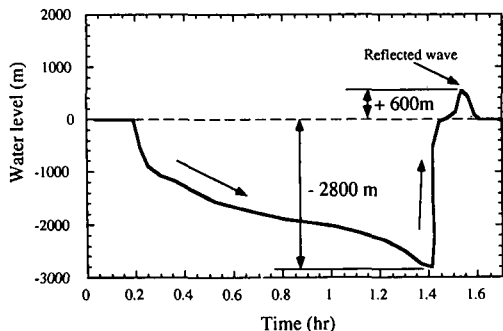


図-6 クレータ周辺での水位時間変化

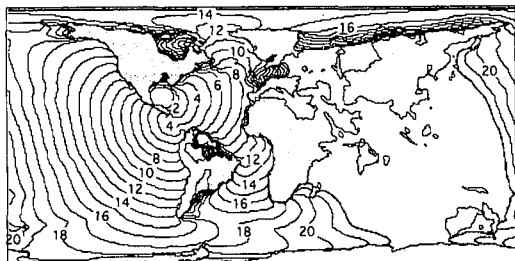


図-7 津波伝播図

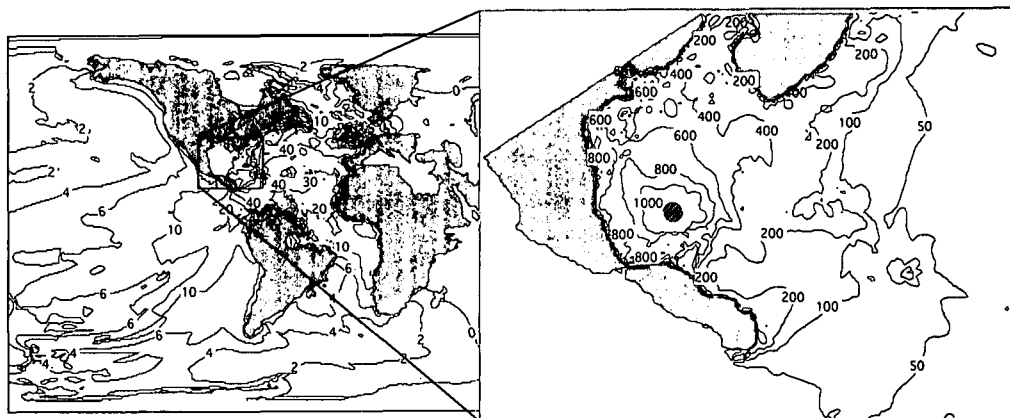


図-8 計算された最高水位分布

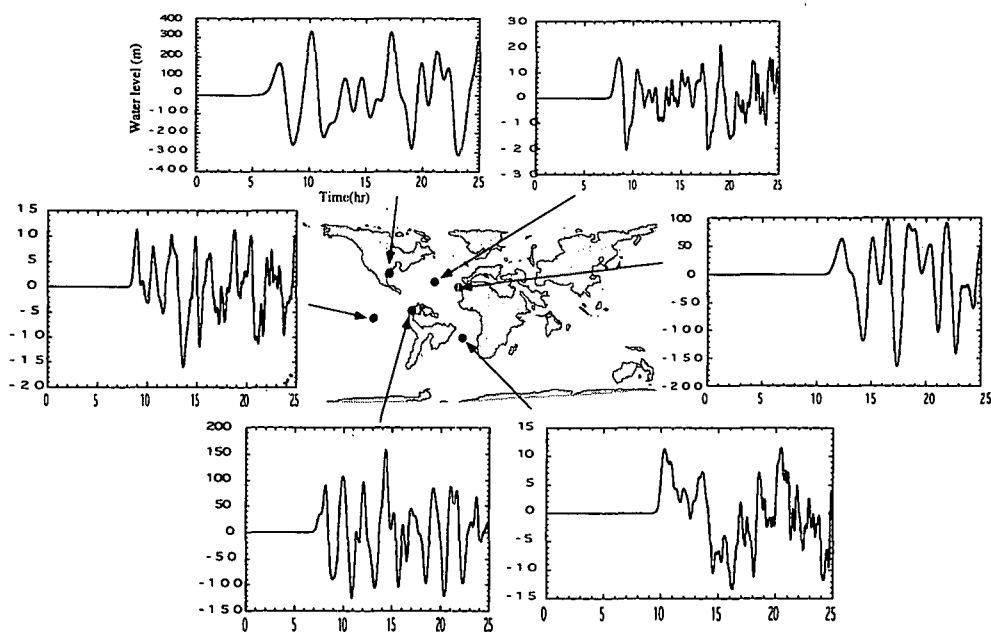


図-9 主な地点での水位時間変化

6. おわりに

今までに、蓄積られたデータと津波解析モデルにより、最大規模の隕石による津波を再現できた。しかし、現在この現象を検証するデータがなく精度を確かめることはできない。今後は、恐龍以外の生物の生存状態などの資料を参考にしながら、本モデルを検証できるデータを探していきたい。例えば、海保(1995)によれば、恐龍などの大型動物と海洋表層に住む生物のほとんどは絶滅したが、25 kg以下の小動物と150 m以深の海底に生息する底生有孔虫と珪質殻から成る放散虫という浮遊性の微生物は生存したようである。津波堆積物と共に、これら

の生息の分布と津波波高や流速などとの関係なども調べる予定である。

謝辞：東北大学大学院理学研究科箕浦幸治助教授には、K/T-impactに関する資料の提供や研究のアドバイスを頂いた。

参考文献

- 今村文彦 (1996): 津波の数値シミュレーションと可視化技術, ながれ, Vol. 15, pp. 376-383.
- 海保邦夫 (1995): 生物大量絶滅にみる地球と生物圏の進化システム, 月刊地球, Vol. 17, No. 7, pp. 482-489.
- 倉吉一盛・今村文彦・首藤伸夫 (1997): 波状段波先端部での

- MAC 法による解析, 土木学会東北支部技術発表会, pp. 220-221.
- 松井孝典 (1997): 巨大隕石衝突のなぞにこだむ Part 1, 2, Vol. 17, No. 4, Newton, 教育社, pp. 70-87.
- Bourgeois, J., T. A. Hansen, P. L. Wiberg, E. G. Kauffman (1988): A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas, *Science*, Vol. 241, pp. 567-570.
- Chapman, C. R. and D. Morrison (1994): Impacts on the earth by asteroids and comets: assessing the hazard, *Nature*, Vol. 367, pp. 33-40.
- Haq, B. U., J. Hardenbol, and P. R. Vail (1987): Chronology of Fluctuating sea levels since the triassic, *Science*, Vol. 235, pp. 1156-1165.
- Imamura, F. and N. Shuto (1989): Numerical Simulation of the 1960 Chilean tsunami, *Proc. Japan-China Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation*, pp. 515-524.
- Kawamata, S., F. Imamura and N. Shuto (1993): Numerical simulation of the 1883 Krakatau tsunami, *IAHR Tokyo*, pp. 24-31.
- Ross, M. I. and C. R. Scotese (1988): A hierarchical tectonic model of the Gulf of Mexico and Caribbean region, *Tectonophysics*, Vol. 155, pp. 139-168.
- Smit, J., T. Roep, W. Alvarez, A. Montanari, P. Claeys, J. M. G. Nishimura and J. Bermudez (1996): Coarse grained, clastic sand stone complex at the K/T boundary around the Gulf of Mexico: Deposition by tsunami waves induced by the Chicxulub impact?, *Geological Soc. Am.*, Special paper 307, pp. 151-182.
- Smith, A. G., A. M. Hurley and J. C. Briden (1981): Phanerozoic paleocontinental world maps, *Cambridge Earth Science Series*, Cambridge University Press, 102 p.
-