

特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」

海洋への隕石落下に伴う津波リスク評価

後藤 和久^{1,2}，飯嶋 耕崇²，和田 浩二³，今村 文彦¹，常 昱⁴

2013年9月14日受領，2013年11月6日受理。

(要旨) 天体が海洋に衝突した場合，巨大津波の発生が懸念される。本稿では，太平洋への隕石落下頻度を検討し，数値計算に基づき日本への衝突津波リスク評価を予察的に行った。その結果，他の災害に比べれば衝突津波の発生頻度は低いものの，現実的な災害リスクとして認識する必要があることがわかった。衝突津波のリスクは確率的に評価が可能のため，現在の量的津波予報のような形でデータベース化することが可能であると考えられる。将来的には，衝突から津波伝播・遡上までの一連の過程の計算を連続的に行うことが望ましい。数値計算技術の高度化が進めば，火星の古海洋の存在可能性の検討など，惑星科学分野での応用範囲も広いと考えられる。

1. はじめに

2013年2月15日にロシア・ウラル地方で発生した隕石落下に伴う衝撃波により，チェリャビンスク市では多くの人的・物的被害が発生した(以下，チェリャビンスクイベント)。チェリャビンスクイベントは，隕石落下という極めて低頻度の事象が人間社会において災害を引き起こしうるということを，あらためて世界中の人々に示したと言える。このイベントでは，天体は空中で分裂・爆発したため衝撃波による被害が中心であったが，地表面に到達する規模の天体が落下すると，落下地点周辺では甚大な被害が発生することは容易に想像できる。

天体衝突は，地球史のスケールで見れば頻繁に発生する現象の一つである。特に，地球表面の約3分の2は海洋で占められている。そのため，過去の天体衝突の多くは海洋で発生したと考えられる。ところが，世界中で報告されている衝突クレーターのうち，海洋衝突によると考えられるものはわずかに20%程度である[1](図1)。後藤ら[2]が指摘しているように，海底の

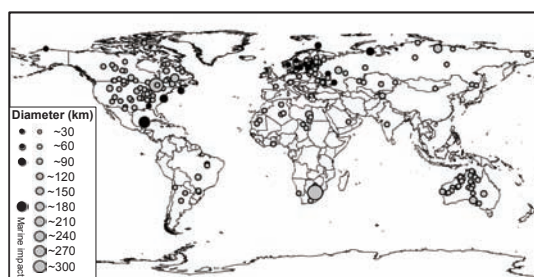


図1：地球上の陸上，海洋衝突クレーターの分布。Earth Impact Databaseに基づく。

衝突クレーターは発見が困難であること，海洋プレートの沈み込みによって大部分がすでに消失していること，海洋衝突クレーターの探査が組織的に行われていないため，北米や北欧など研究が特定地域に偏っていることなどが理由としてあげられる。

海洋衝突現象を災害としてとらえた場合，衝突により発生する様々な現象の中でも津波の影響が大きいものと考えられる。これは，陸地から離れた地点で衝突が起きても，津波は広域に伝播し沿岸部の広い範囲に影響を及ぼしうるためである。本稿では，衝突に伴う津波(以下，衝突津波)に焦点を絞り，既往研究のレビューと，予察的な数値計算結果に基づき我が国沿岸部への影響について検討する。

1. 東北大学 災害科学国際研究所
2. 東北大学大学院 理学研究科
3. 千葉工業大学惑星探査研究センター
4. 東京大学大学院 理学系研究科
goto@irides.tohoku.ac.jp

2. 衝突津波の研究事例

衝突津波に関する既往研究は、地質時代に起きた巨大衝突に伴う津波の規模を推定した研究、地球に将来衝突する可能性のある天体を想定した研究、または衝突頻度を踏まえて津波リスク評価を行った研究に区分することができる。以下に、それぞれの代表的な既往研究をまとめる。

まず、地質時代に起きた衝突津波としては、約6600万年前のチチュルブ(Chicxulub)衝突(メキシコ・ユカタン半島) [3]やエルタニン(Eltanin)衝突[4]が代表的事例として挙げられる。チチュルブ衝突は、水深200 m(または600–2000 m)の海域で起きた巨大衝突であり、衝突天体の直径は約10 km、クレーターのサイズは約180 kmと推定されている。Matsui et al. [3]は、津波発生、伝播、遡上計算までを実施し、衝突クレーターへの海水の流入・流出に伴い発生した津波は、最大波高約300 m、周期10時間と推定している。

約215万年前に発生したエルタニン衝突は他の事例

とは異なり、衝突クレーターは発見されていない。深海掘削試料中の津波堆積物にイジェクタが取り込まれている様子が観察されており、直径1-4 km程度の天体が深海域に衝突したものと推定されている[4]。衝突天体のサイズにより異なるものの、この衝突に伴って発生した津波は、チリ沿岸部に到達時に100 mを超えていたものと推定される[5]。また、太平洋沿岸には、同時代に堆積したと思われる津波堆積物が報告されており、エルタニン衝突津波起源である可能性が指摘されている[6]。このように、地質時代に起きた衝突津波に関する研究は、クレーターやイジェクタ、津波堆積物が存在するなど、衝突津波の規模を評価するための材料が得られている事例に限られている。

地球に将来衝突する可能性のある天体を想定した研究の代表例は、西暦2880年3月16日に地球に衝突する確率が0.3%未満の小惑星1950DA(直径1.1 km)を例とした研究である。Ward and Asphaug [7]は、大西洋にこの規模の天体が衝突したと仮定した場合、アメリカ東海岸に100 m超の津波が押し寄せる可能性がある」と推定している。衝突頻度を踏まえて、津波リス

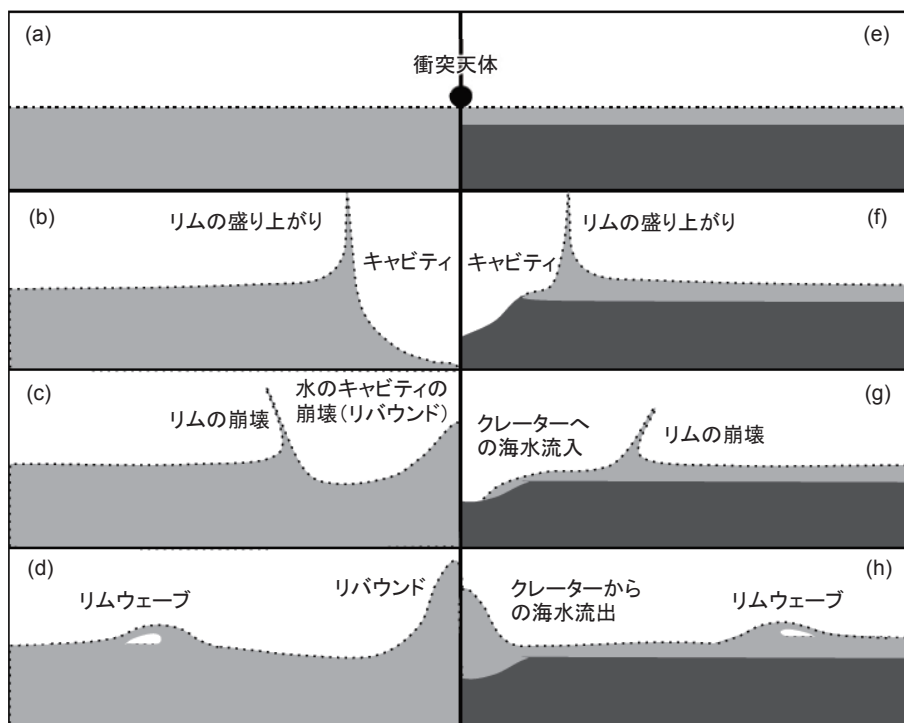


図2：(a)-(d)海底面にクレーターが形成されない場合の津波発生メカニズム。(e)-(h)海底面にクレーターが形成される場合の津波発生メカニズム。

ク評価を行った研究の代表例としては、Ward and Asphaug [8]が挙げられる。彼らは、衝突津波のリスクを確率的に評価し、東京やニューヨークなど世界の大都市に今後1000年以内に来襲しうる津波の波高とその確率を推定している。

2000年代前半の議論は、津波の波高や波長を解析的に求めたものが多いのに対し、2000年代後半になると、衝突プロセスから津波発生・伝播までを数値計算により求める研究が多くなされるようになった[9-11]。その結果の多くは、Ward and Asphaug [8]に代表されるような従来の解析的な研究は、衝突津波のリスクを過大評価していることを指摘している。

海水中に衝突孔(キャビティ)が形成されると、縁(リム)の盛り上がりはリムウェーブとして外向きに伝搬していく(図2a-d)。一方、キャビティ自体は水の流入や底の上昇(リバウンド)によって崩壊し、元の状態に戻ろうとする。衝突により発生する津波は、上記の過程の中でリムウェーブと水のキャビティの崩壊(またはクレーターへの海水の流入と流出)により発生すると考えられる[3]。リムウェーブは、波高は高いものの周期が極めて短くすぐに分散してしまうため、通常は考慮されない。衝突津波の数値計算を行った研究のほとんどは、水のキャビティの崩壊またはクレーターへの海水流入・流出を対象としている。

Wünnemann et al. [10]は、衝突に伴う津波発生プロセスを数値計算により検討し、深海での衝突後のキャビティ崩壊に伴い発生する波は、非線形性が強く急速に減衰するため、地震性の津波の数値解析などで利用される浅水理論の適用外となる場合があることを指摘している。彼らの計算によれば、深海域での衝突ではクレーターが形成されず、水のキャビティは数分で復元される。そのため、波の周期も数分～数十分と短く、地震性の津波(数十分～1時間以上)と比べても短い波になることがわかる。

同様に、Gisler et al. [11]は、数値計算の結果から直径500 m以下の小天体が海洋に落下しても、沿岸部に甚大な影響を及ぼすような大きな津波は発生しないとしている。その理由として、キャビティの崩壊のプロセスでは、波長が短い波(キャビティの直径の2倍程度が最大)が発生する。そのため、深海域で碎波すること、衝突に伴う風の影響で進行が妨げられることにより、こうした波は遠方まで効率的に伝播しないと

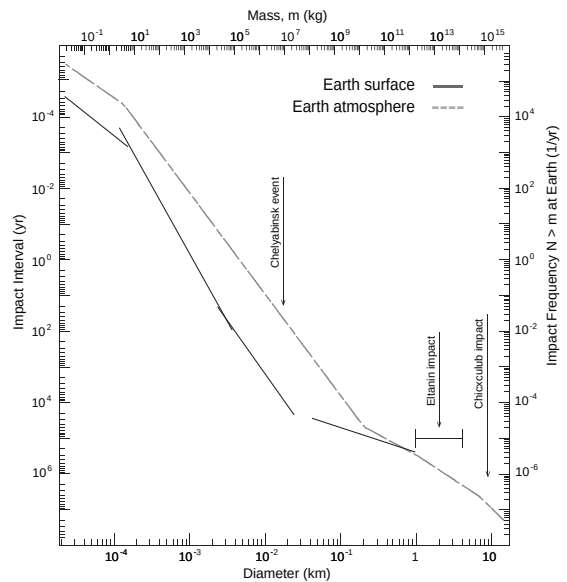


図3：衝突天体の直径と衝突頻度の関係(Bland and Artemieva, [13,14]を改変)。地球表層への衝突頻度は、大気圏に衝突する頻度より大幅に低くなる。

考えられる。Gisler et al. [11]の推定では、直径500 mの天体が5 kmの深さの海に衝突しても、沿岸部での津波高は2004年インド洋大津波(<30 m)より規模が小さいと考えられる。

以上の研究は、衝突地点の水深が深く衝突天体のサイズが小さければ、長波として遠方まで伝播しうる津波が発生しないことを意味している。その一方で、衝突地点の水深が浅く天体のサイズが大きければ、海底にクレーターが形成され(図2e-h)、場合によってはリムにより衝突クレーターへの海水流入が阻止されるため、やはり効率的に津波が発生しないということになる。つまり、衝突天体のサイズと衝突地点の水深をパラメータとして、あるサイズの衝突天体に対して、発生する津波が最大になりうる水深が存在すると予想される。しかしながら、こうした可能性についての検討事例はまだない。もちろん、以上は理想的な地形条件下で言えることであって、津波の発生や伝搬には海底や地上の地形や地質の影響がかなり効くことに留意が必要である。

3. 衝突津波の発生頻度

地球への天体衝突頻度についての既往研究[12]に基づけば、直径10 m、直径100 m、直径500 mの天体の地球(大気圏)への衝突頻度は、それぞれ約10年、6000年、14万年に一度程度となる(図3)。ただし、こうした頻度分布は小惑星帯の小惑星のサイズ分布や月面のクレーターのサイズ分布などから推定されている。厚い大気を有する地球の場合、大気圏通過中に天体が分裂する場合があります、実際に海面に衝突する際のサイズが大気圏に突入する前のサイズと同じとは限らない。また、衝突津波の発生頻度を議論するには、陸域を除いた海洋に衝突するケースのみを考慮する必要がある。

Bland and Artemieva [13, 14]は、大気中で天体が破壊される効果を考慮した場合の地表面への衝突頻度を推定している。それに基づけば、直径数100 m以下の天体が大気圏に突入しても粉々になり、破片集団として質量で2割程度が地球表面に落下するにすぎないと考えられる。また、地表面に直径10 m、100 mの天体が衝突する頻度は、それぞれ約1500年、4.5万年に一度程度と、大気圏に突入する時点での天体のサイズを用いた頻度分布より数桁低い頻度となる(図3)。一方、直径500 mクラスになると大気の影響をほとんど受けないので、地表面への衝突頻度は15万年に一度程度となり、大気圏に突入する頻度と大きくは変わらない。

ここで、日本への衝突津波の影響を考える場合、太平洋が地球表面に占める割合(約1/3)を考慮する必要がある。つまり、日本に影響を及ぼしうる津波の発生頻度(=太平洋への衝突頻度)は、直径10、100、500 mの天体について、それぞれ4500年、13.5万年、45万年に一度程度と極めて低くなる。

4. 衝突津波リスク評価は必要か？

2章と3章で述べたように、衝突津波は従来考えられていたよりも効率的に伝播しないと考えられることに加え、海洋に実際に衝突する際の天体のサイズを用いた場合の衝突頻度は低い。人間社会、特に日本に影響を及ぼしうる太平洋への衝突に限定すれば、その発生確率はさらに低くなる。ただし、確率が低ければ衝

突津波のリスク評価を行わなくても良いというわけではない。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波は1000年に1度程度の低頻度災害であった。チェリャビンスクイベントも、同サイズの天体の衝突頻度だけ見れば100年に1度程度と比較的高頻度であるが、人口密集地帯で発生する確率ははるかに低かったはずである。河田[15]によれば、我が国での歴史上の地震・津波災害のうち、1割の低頻度巨大災害で、9割の犠牲者数を占めており、低頻度巨大災害のリスクを評価することが、いかに重要かがわかる。

また、既往研究の問題として、伝播・遡上計算がほとんど実施されていない点が挙げられる。これは、衝突プロセスから津波発生、伝播、遡上までの一連の計算を連続して行うことが現在の技術・計算機的能力では困難なことが最大の理由であろう。実際に、衝突津波の研究をこれまで行ってきた研究者の多くは衝突計算の専門家であり、津波の広域伝播計算が実施された例はほとんどない。

衝突津波の研究は、津波高が100 mを超える場合があり得るため、地球史を研究する地球科学者の大きな興味の対象でもある。そのため、地質スケールの痕跡が残るかが重要で、数値の大きさが取り上げられがちであるという問題もある。Gisler et al. [11]は、500 mの天体が5 kmの深さの海に衝突しても、2004年インド洋大津波より沿岸部での津波高は小さいと結論している。これは、地球史上のイベントとして考えた場合、広域に影響を及ぼしうるような規模にはならないという、惑星科学・地球科学的な考え方ではある。しかしながら、自然災害として考えた場合、Gisler et al. [11]が比較対象として挙げた2004年インド洋大津波で、20万人を超える犠牲者が出たことに目を向けなければならない。つまり、災害としては十分に大きいのである。

5. 日本を対象とした衝突津波の伝播計算

本研究では、実際にどの程度の津波が我が国沿岸に襲来するかを予察的に検討するため、津波の伝播計算を実施した。初期条件として、衝突天体の直径(10、50、100、500 m)から、Ward and Asphaug [8]に基づきクレーター直径と深さをまず推定した。ここで、リムウェーブの影響は無視して初期水位分布を与えた。

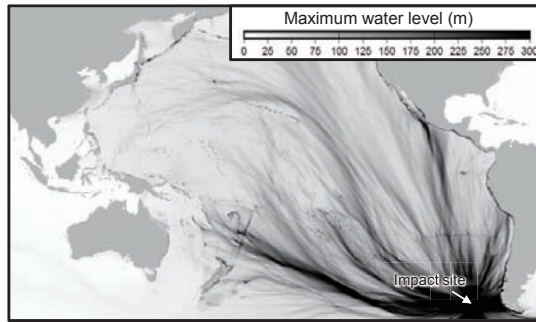


図4：エルタニン衝突を仮定した場合の太平洋全域での最大水位分布(m)。

また、海洋底にどの程度のサイズのクレーターが形成されるかについては系統立てて評価した研究事例がほとんどないため、本研究ではクレーターが海底に形成されない程度の深さに天体が衝突した場合についてのみ評価対象とした。つまり、水のキャビティが衝突により形成された状態を初期条件とし、キャビティが崩壊することで津波が発生すると仮定している。また、衝突に伴う海水蒸発の効果は考慮していない。

津波の伝播計算には、浅水理論を用いた[16]。ただし、初期条件によっては非線形性や分散性が強くなり、浅水理論が成り立たない場合があり得るため、将来的には砕波の影響なども考慮した高度なモデル(ブジネスクモデルやMAC法など)を使用する必要がある。なお、計算に用いた地形データは1 km メッシュで、日本近海の数々の水深エリアにクレーターを設置し計算を実施した。

まず、本研究での計算結果と既往研究を比較するた

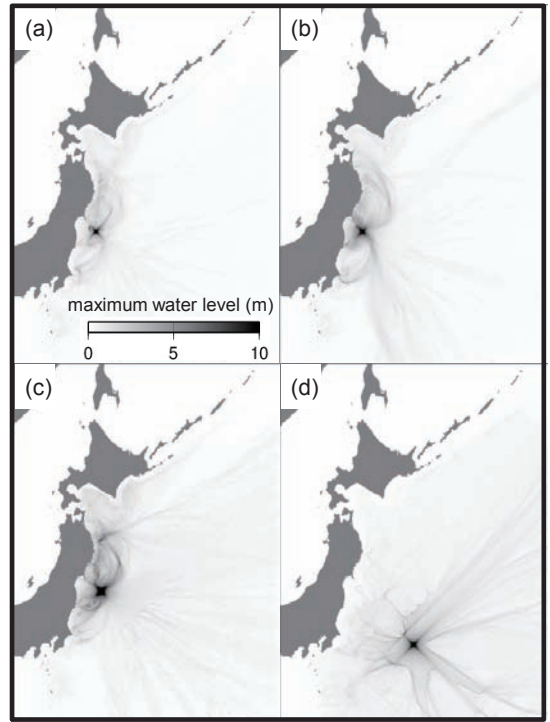


図5：直径10 kmの天体が水深(a)210 m, (b)500 m, (c)1000 m, (d)5000 m地点に衝突した際に発生する津波の最大水位分布(m)。

め、エルタニン衝突を仮定し Ward and Asphaug [5] の結果との比較を行った。ここで、約215万年前の海水準は、現在より0-50 m程度低かったと考えられるが[17]、先行研究との比較を主目的としているため、海水準は現在と同じと仮定して計算を行った。図4に

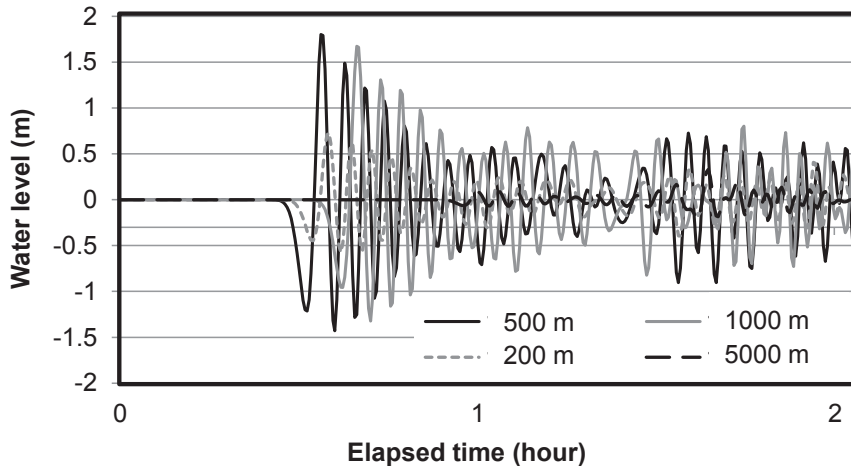


図6：図5に示した各事例について、東北沖の水深50 m地点での水位の時系列変化。



図7：直径500mの天体が水深5000m地点に衝突した際に発生する津波の最大水位分布(m)。

示すように、基本的には衝突地点からの距離が増すほど津波高さは低減していき、約1000 km地点での波高は100 m程度と、Ward and Asphaug [5]の結果とおおむね整合的であった。この場合、我が国沿岸での沖合いの津波高は約30 m程度となる。

図5には、直径10 mの天体が日本近海での水深210 m, 500 m, 1000 m, 5000 mの海洋に衝突した場合(クレーター直径1.0 km, 深さ0.2 kmを仮定)の最大水位分布を、図6には各地点で発生した津波が水深50 m地点に到達した際の水位の時系列変化を示している。海岸線付近では、浅水変形によりさらに水位が増大すると考えられる。図5を見ると、衝突地点から沿岸部までの海底地形を反映して波の指向性が確認できる。また、図6から、水深500 mに衝突した場合の水位がもっとも沿岸部で高いことがわかる。これは、2章で述べたように衝突天体のサイズと水深により、発生する津波が極大となる事例が存在することを示唆している。

図7には直径500 mの天体が日本近海の水深5000 mの海洋に衝突した場合(クレーター直径12 km, 深さ4

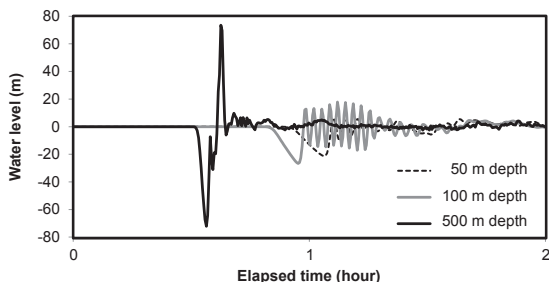


図8：図6に示した各事例について、東北沖の水深500m, 100m, 50 m地点での水位の時系列変化。

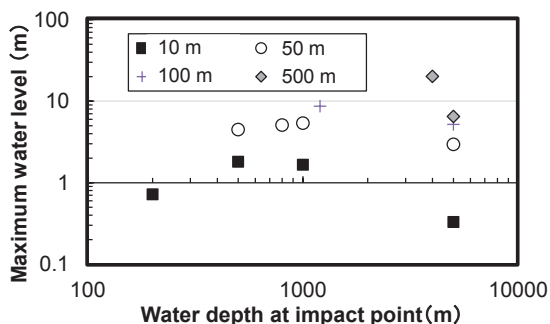


図9：各直径の衝突天体が特定の水深に衝突した際の、水深50 m地点での最大水位(m)。

kmを仮定)の最大水位分布を、図8には水深50 m, 100 m, 500 m地点での水位の時系列変化を示している。衝突地点周辺では100 mを超える水位となるものの、沿岸部に押し寄せるのにつれて急速に水位が低減し、東北地方沿岸の水深50 m地点ではわずか数mにまで減衰する。この理由はまだ明らかではないが、大陸棚縁辺部で急速に水位が低下しているように見えることから、大陸棚で反射波が発生し、その影響による波のエネルギー減衰などが考えられる。大陸棚の沖合では、第一波の押し波が到達する前に約80 mもの水位低下から始まっており、大陸棚上が浅瀬になるほどの水位変動が起きることになる。その後80 mの水位の波が押し寄せるため、波形勾配が増加し大陸棚縁辺部で砕波が起きることも考慮する必要がある。こうした大陸棚の影響はヴァン・ドーン効果と呼ばれ[18]、衝突津波の沿岸波高を低減させるのに大きな効果を發揮していると言える。一方で、伊豆－マリアナ海溝沿いの島々周辺など、大陸棚が存在しない場所では、水位が高くなっていることがわかる。

図9には、各衝突天体のサイズについて、衝突地点

の水深と水深50 m地点での最大水位を表示している。この図からも、津波の波高は必ずしも衝突天体のサイズや衝突地点の水深に依存せず、津波が最大となる衝突天体のサイズと衝突地点の水深の組み合わせが存在することが予想される。太平洋に直径10 mの天体が衝突する確率は4500年に一度程度と推定されるが、この程度の小規模衝突でも、沿岸部での津波高は数mに達し、被害が生じうることは留意すべきであろう。

6. まとめ

衝突津波の発生頻度は、他の災害に比べれば低いものの、現実的な災害リスクとして認識する必要があることは確かである。重要なのは、衝突津波のリスクは確率的に評価が可能な点である。この点は、海底火山カルデラ崩壊や海底地すべりに伴う津波など、どこでいつ発生するかを確率的に予測することが困難な事象とは大きく異なる。国や自治体、原子力発電所の安全審査等、どの程度の発生頻度のハザードまで考慮するかは対象によって異なるものの、衝突津波の影響は太平洋全域を対象に多数の計算を一度実施しておけば、現在の量的津波予報のような形でデータベース化することも可能である。

一方で、衝突津波は惑星科学的にも興味深い現象の一つである。例えば、Iijima et al. [19]は、火星に海洋が存在したと仮定して衝突津波の数値計算を実施し、どのような地形条件の場所で衝突津波の地質学的痕跡が残るかを検討している。超高精度の衛星画像が得られるようになった現在、数値計算により津波の地質学的痕跡が見出せる可能性のある画像(地点)を選定することで、効率的に研究を実施できるという利点もある。

今後の検討課題としては、クレーターが海洋底に形成される規模、水深での衝突津波の計算を行う必要がある。この場合、津波の周期がより長くなると予想され、今回の検討とは大きく異なる結果になると予想される。また、海水蒸発の効果、グリッドの細分化や高度なモデルを使用するなどの検討が必要である。

謝 辞

査読者であるダヌンツィオ大学の小松吾郎博士には、

本稿を改善するにあたって極めて有益なご意見を賜った。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] Dypvik, H. and Jansa, L. F., 2003, *Sediment. Geol.* 161, 309.
- [2] 後藤和久ほか, 2004, *遊星人* 13, 241.
- [3] Matsui, T. et al., 2002, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 356, 69.
- [4] Gersonde, R. et al., 1997, *Nature* 390, 357.
- [5] Ward, S. N. and Asphaug, E., 2002, *Deep-Sea Res. II* 49, 1073.
- [6] Goff, J. et al., 2012, *The Holocene* 22, 1067.
- [7] Ward, S. N. and Asphaug, E., 2003, *Geophys. J. Int.* 153, F6.
- [8] Ward, S. N. and Asphaug, E., 2000, *Icarus* 145, 64.
- [9] Weiss, R. et al., 2006, *Geophys. J. Int.* 167, 77.
- [10] Wünnemann, K. et al., 2007, *Meteorit. Planet. Sci.* 42, 1893.
- [11] Gisler, G. et al., 2011, *Pure Appl. Geophys.* 168, 1187.
- [12] Chapman, C. R. and Morrison, D., 1994, *Nature* 367, 33.
- [13] Bland, P. A. and Artemieva, N. A., 2003, *Nature* 424, 288.
- [14] Bland, P. A. and Artemieva, N. A., 2006, *Meteorit. Planet. Sci.* 41, 607.
- [15] 河田恵昭, 2001, *防災学ハンドブック*(朝倉書店), 740p.
- [16] Goto, C. et al., 1997, *IUGG/IOC Time Project, IOC Manuals and Guides*, 130 pp.
- [17] Compton, J. S., 2011, *Quart. Sci. Rev.* 30, 506.
- [18] Melosh, H. J., 2003, *LPSC Abstract*, #2013.
- [19] Iijima et al., in press, *Planet. Space. Sci.*