

日本の「隕石孔」

古本 宗充¹，原 宏史¹

1. 日本に隕石孔があるか？

地球上で隕石孔として確認されているものは現在160カ所ほどであり[1]，年々数個ずつ新たに付け加えられている。一方，日本国内もしくは近海の範囲において隕石孔として確定されたものはまだない。このことは多くの場合特段気にとめられることはない。なぜなら，地球の表面積に対して日本付近の面積が狭いので，隕石孔形成の確率自体が小さいと考えられる。それに加えて，日本列島がプレート境界に位置することから来る，激しい地殻変動と浸食作用等によって，隕石孔が形成されたとしても速やかに消滅するだろうと考えるのが常識的である。実際，多くの隕石孔が安定した大陸において発見されていることも，これを裏付けている。では，実際に日本において隕石孔が発見できる可能性はほとんどないのであろうか。これまでに知られている隕石孔のデータに基づいて，その存在確率のおおざっぱな見積もりを試みる。結論から述べると，見つかったもよい程度の確率と考えられる。

図1に示したのは，地球上で発見された隕石孔のうち約1億年よりも若い隕石孔の直径と年齢の関係である。このようなプロットにしてみると，発見される隕石孔の直径と年齢の組み合わせは，ある帯状の部分に限られることが分かる。上限は浸食などによる隕石孔の消滅によるものである。隕石孔はいずれ消滅するが，大きい隕石孔ほど長命であることを表している。一方下限は隕石孔の生成確率から来ている。隕石孔の生成率とサイズの間にはべき関数

の関係があり，大きい隕石孔ほど生成確率が小さい。よって大きな隕石孔ほど古い時代まで含んだ長い間隔でないと出来にくいことを示している。確率的に言えば，若い年代をもつ大きな隕石孔も起こりうるはずであるが，図1は隕石孔の生成が統計的に期待されるとおりに起きていることを示している。

日本のような浸食のさかんな地域では，上限が下がると想像される。もし隕石孔の消滅が単純に浸食によって起きると仮定すると，浸食量が隕石孔の深さ程度になった段階で消滅が起きることになる。一方隕石孔のサイズとその深さは比例しているので，隕石孔の寿命はサイズに比例することになる。しかしながら図1の上限をみると，実際には隕石孔の年齢の上限はおおよそサイズの二乗に比例している。つまり単純な浸食によるとする予想よりも消えにくいことを示している。

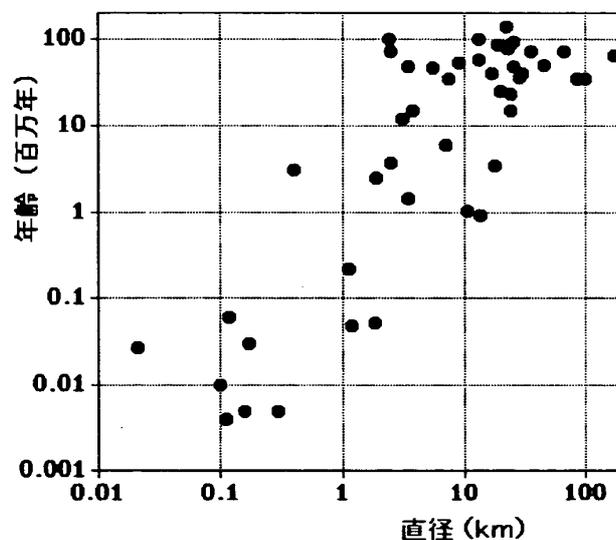


図1：世界の隕石孔の直径と年齢の関係 ([1]による)。

¹ 金沢大学自然科学研究科物質構造科学専攻

ところで、この消えにくさの要因の一つは隕石孔の埋没であると考えられる。隕石孔が形成直後に堆積物で覆われれば、当然寿命が延び保存状態がよくなるはずである。世界の約160個の隕石孔のうち、約50個が海底を含めて地表には露出していないのである。約25%の隕石孔が埋没「保存」をされていることになる。日本においても平野部や近海など堆積速度が大きい地域が広がっており、運良くこうした部分に隕石孔が形成されれば、保存が良いはずである。

図1に示されている隕石孔はほとんど安定大陸にあるものである。日本における浸食率、つまり地表が削り取られる速度は、こうした安定大陸におけるものより1桁以上大きい[2]。もし、浸食率だけが隕石孔の寿命を決めているとすれば、日本の隕石孔の寿命は1桁以上短いことになる。上でみたような「消えにくさ」があるとすれば、これは少し短命よりの見積もりを与えるはずであるが、以下はこの仮定で議論を進める。

図1の分布を見ると、直径5km程度の隕石孔の年齢の上限は数億年である。日本の隕石孔の寿命が、これら安定大陸のものより1桁強短かったとしても、最大2~3千万年の寿命を持っていると推定できる。つまり日本の場合隕石孔の保存が難しいとしても、直径数kmのもので2~3千万年程度以内の年齢であれば、その痕跡を保っている可能性があることになる。

では、過去2~3千万年間に直径数kmの隕石孔が日本周辺にできた可能性はどの程度であろうか？地球のデータはまだ不完全であり、それを見積もるのは難しいので、月のデータを利用する。月面における光条クレータは最近8億年程度の比較的若い隕石孔と考えられており、最近の隕石孔形成率を見積もることができる。月と地球との形成率には若干の差があるが、ここではほぼ等しいとする。Morota and Furumoto [3]による光条クレータの分布密度を利用して、直径数km程度のクレータの密度を見積も

ると、 10^5 個/km²程度の密度になる。光条クレータが過去8億年程度の間形成されたとすると、2~3千万年間は 10^6 個/km²のオーダーと見積もられる。日本付近で近海も含む面積として 5×10^5 km²を考えると、このサイズの隕石孔の期待値は1個程度のオーダーになる。もちろんこれは非常に粗い見積もりである。しかしながら上記のデータや議論は、日本付近において直径数kmの隕石孔があっても、非常に希な偶然の産物ではないことを意味している。

より小さな隕石孔を想定した場合でも、年齢を若くすれば上と同様の議論が成り立つ。つまり、直径数kmより小さくてより若い隕石孔が同様の確率で存在するはずである。図1の上限や下限の傾きを参考にすると、隕石孔の大きさが1/10になれば、その最大の年齢は1/100程度になる。例えば、直径数100mの隕石孔であれば数十万年、また数十mの隕石孔の場合数千年以内に形成されたものが残っている可能性がある。以上のことから、日本においても、まじめに隕石孔探しを行うだけの意味があると考えられる。

2. 提案された「隕石孔」

日本国内においても、これまでに何度か隕石孔の候補が提案されてきている。我々が知り得た範囲で、これまでに日本の「隕石孔」として提案された地形・構造を表1にまとめてある。ただし、多くの場合新聞等に掲載されたのみで、出典の確認が難しい。篠田[4]のまとめによってのみ出典を知ることができるものは、出典を篠田[4]とした。ただし、知り得たすべてを均等に扱ったので、提案されたものの中には多くの人が首を傾げるであろうものも含まれている。これらの「隕石孔」は、提案がなされた後に成因について科学的検討を加えられたものは少なく、現時点でこのうちどれも隕石孔と確認されていない。高松クレータ以外、議論に必要な情報がほとんどないので、ここでは個々の「隕石孔」について科

表1 日本の「隕石孔」として提案されたもの

番号	名前	所在地	直径	文献等
1	日本海	日本海	数100km	[5]
2	星窪	沖縄県中頭郡宜野湾村	20m	久保茂, [4]
3	星窪	同上	40m×60m	久保茂, [4]
4	赤尾木湾	鹿児島県大島郡滝郷村	3.2km	山口志摩雄, [4]
5	星窪	同上	80m	山口志摩雄, [4]
6	星窪	沖縄県国頭郡国頭村	70坪	松村巧, [4]
7	戸田峰	富山県婦負郡八尾町	10m	赤井純治, [4]
8	シンガハタの池	長野県木曾郡大滝村	50m	酒井潤一, [4]
9	鬼の足跡	長野県佐久郡南相木村	18m	依田吉郎, [4]
10	御池山	長野県下伊那郡	900m	[6]
11	高松クレータ	香川県高松市, 香川町	4km	[7], [8]
12	飛騨山地	岐阜県北部	70km	[9]

学的な検討は行わない。ただし、高松クレータについてはその提案以来何人かの研究者が様々な観点から研究を行っており、その成因について論争が行われてきているので、この構造については後で詳しい紹介を行う。

3. 隕石孔と紛らわしい地形

隕石孔の最も一般的でかつ明瞭な特徴は、クレータつまり円形の窪地であるという点である。地表に表れている隕石孔の発見や提案の多くは、この特徴をもとに行われている。表1でまとめた日本での提案でも、そのほとんどが地形的特徴によるものである。

言うまでもなく、円形もしくは円に近い形状の窪地は隕石衝突以外でもできる。最も隕石孔に似ているのは、カルデラ等の火山爆発もしくは火山活動に絡んだ構造運動によって作られたものである。有名なアリゾナクレータ(バリンジャークレータ)でも、火山性か衝突によるものかの議論が行われた。その当時はまだ隕石衝突という現象の存在自体が議論の対象であった時代ではあるが、両者の識別が難しいことを端的に示している。

火山性のクレータ以外にも円形に近い窪地を作る現象が幾つかあり、隕石孔探しには注意が必要である。その第一の原因は火山性でない構造運動によるものである。幾つかの断層に囲まれた地域が断層運動の結果窪地になり、その後の堆積作用などで円形の窪地になることが考えられる。しかしながら、図2に示した赤尾木湾(表1中の4番)などの地形をみると、単純にこうした過程でできたとは思えない

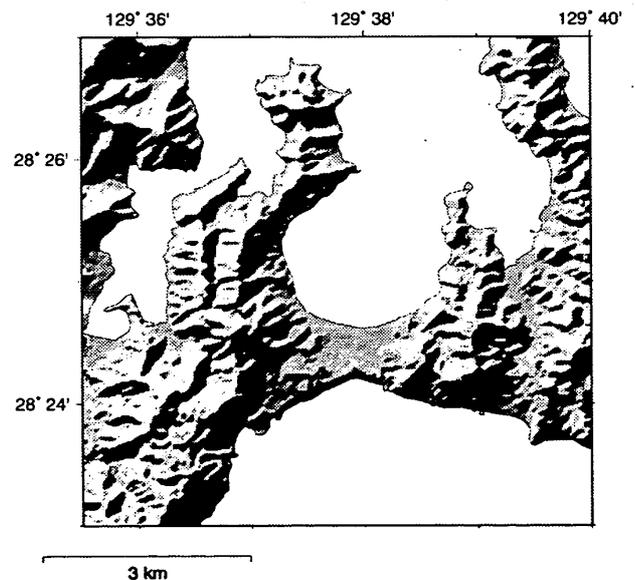


図2：鹿児島県奄美大島北東部の地形。中央付近の円形の湾(直径約3km)がその形状からクレータ候補とされた赤尾木湾である。

ほど円形になっているものもある。

第二のものは浸食地形である。例えば石灰岩地帯にみられる溶食地形、ドリーネやその大型化したポリエ、である。秋吉台などの大規模なものでもなく、小規模な石灰岩質の岩体は日本国内に散在している。よって直径が10mオーダーのドリーネが、そうと思われない地域に存在している可能性がある。表1中の2番と3番の地形はドリーネであると推定されている[4]。その他、通常の浸食や山崩れなどによってできた地形でも、半円形や円弧状の形状になることは頻繁にみられる。

第三のものは少し特殊であるが、日本でみられる可能性があるのを指摘しておく。それは第二次大戦中に行われた爆撃の跡である。現在市街地になっている地域では、こうした痕跡は無くなっていると考えられる。しかしながら、山地部において誤爆や遺棄された爆弾によって作られた窪地が残っている可能性がある。これは小さな(直径数mオーダー)隕石孔のようにみえるはずである。なおこの場合、同程度の大きさのクレータが多数できているはずで

あり、この原因の一つの目安になる。

4. 重力異常による発見

地形観察に次いで隕石孔を発見する有効な手法は、重力探査によるものである。重力異常は地下の密度分布を反映しており、地下に低密度の領域があれば負の重力異常になる。浸食により隕石孔の外形が変わっていても、また厚い堆積物に覆われていても、地表の観測から容易に探ることができるという利点が重力探査にはある。隕石孔が堆積物に覆われている場合、孔の作られた基盤岩と上を覆う堆積物の密度差が大きいため、大きな重力異常になることが期待される。

重力探査では通常ブーゲ重力異常図を描くことが多い。この異常図上で、多くの場合隕石孔の地域は円形の負の重力異常値域になる。これは地形図状で円形の窪みを探すのと同様で、特徴的なパターンであり認識しやすい点も利点である。

また、通常の地下構造での重力異常分布は空間

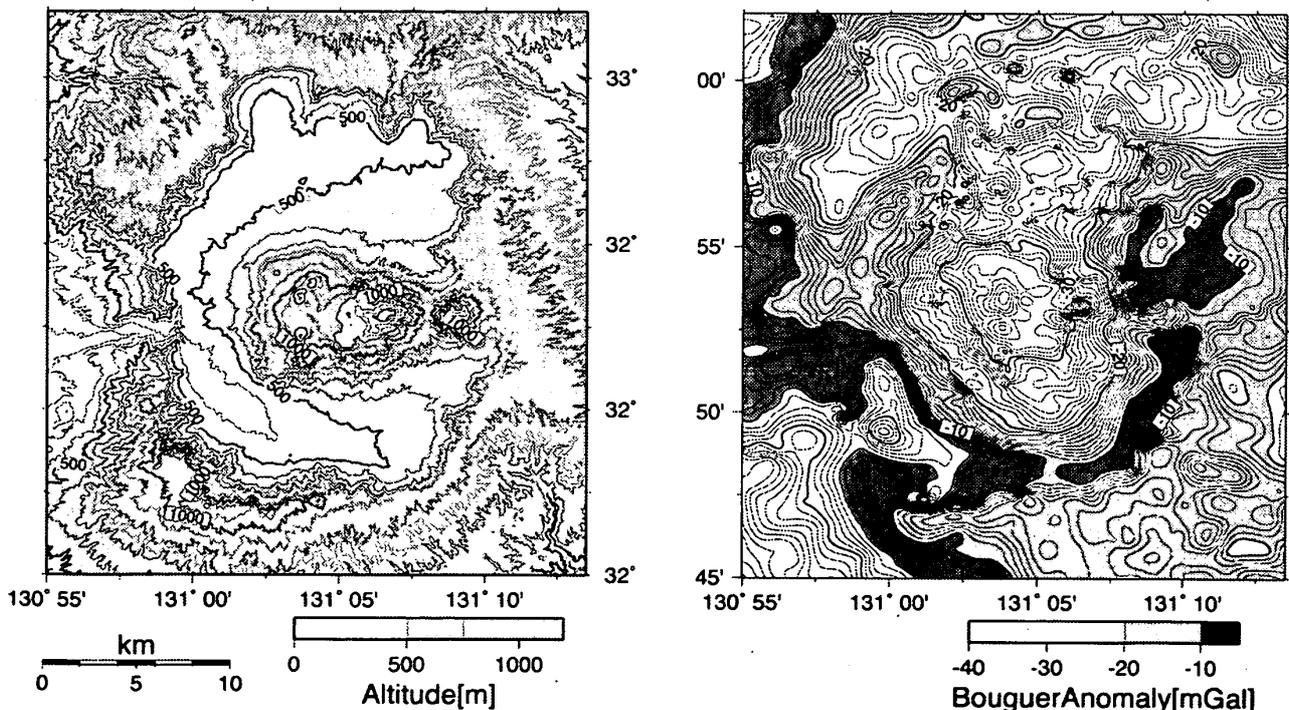


図3：阿蘇カルデラ付近の(A)地形と(B)ブーゲ重力異常分布。カルデラに対応した負のブーゲ重力異常域が見られる。的に緩や

かに変動している。一方隕石孔の縁付近では重力異常値が急変する可能性が高い。つまり、離散的な測定点分布でも、運良く1点が隕石孔の範囲に落ちれば、周りに比べて異常な測定値を示し、地下に何らかの異常構造があることが分かる。後で詳しく述べる高松クレータも、数km間隔で重力測定をしていて、その中の1点が周りに比べて大きな負の重力異常値を示したことから発見につながっている。(当時独立に測定をしていた金沢大学と名古屋大学の2グループが同じ異常に気づいており、こうした異常が発見され易いことを示している。)

ただし、地形から隕石孔を探したときと同様に、重力異常の様子のみからはその構造が隕石孔なのか他の原因の低密度領域かの区別はできない。例として、図3は阿蘇山周辺の地形とともにブーゲー重力異常図を示してある。この場合原因がカルデラと分かっているが、そうした情報がない例えば他の惑星のデータだとしたら、これが火山か隕石孔かの区別は難しいことがよく分かる。両者の区別は多くの隕石孔について難しい問題であったし、今後もそうであろう。

5. 高松クレータ

高松クレータ(ここで「クレータ」とは隕石孔を示す物ではなく、円形の窪地をさす言葉として使用している)は重力異常調査によって発見されたもので、現時点までの隕石孔候補の中では、最もそれらしいものである。このクレータは東西に延びる讃岐平野の南端付近に位置している。クレータより数km南には活断層である長尾断層が東西方向に走っており、これを境にして南側に讃岐山地が広がっている。図4Aに示したのは、クレータを含む領域の地形図である。南側が若干高くなっていて、所々に比高200m程度の小さな山が点在する以外は基本的に平坦な地形であり、クレータが存在することは地表からは全く分からない。

高松クレータの発見とその地下構造の詳しい研究は、主に重力探査によって行われている[7]。さらに物理探査としては反射法探査や地磁気探査[8]や電磁探査[10]も行われている。これらの解析結果は手法により多少の差があるが、基本的には調和的である。図4Bは地形図と同地域のブーゲー重力異常図である。この範囲内の重力測定点の総数は約500点であり、クレータ付近ではおおよそ200m間隔程度の測定点密度になっている。重力異常を計算する際の地表の岩石密度は 2670kg/m^3 を仮定しているが、地形の起伏が小さいので、仮定した密度に誤差があるとしても、結果に対する影響は小さい。

重力異常から推定される高松クレータの構造は、直径4kmで中心部の深さが1.5km程度のお椀型をした窪地である。一方電磁探査からは深さ700m付近から高比抵抗岩体になると推定された[10]。この構造は、基盤岩である花崗岩に孔があいた形でできており、その中を花崗岩よりも低密度と低比抵抗の、新しい時代の堆積物が埋めていると考えられる。なお、この報告を書いている時点で、クレータの北部で温泉のためのボーリングがおこなわれている。それによれば、深度1100m付近でクレータの底に達したとされる(三浦, 私信)。

地質的な面からみると、この地域の基盤は領家花崗岩類である。平野部ではこの基盤の上を新しい堆積物である三豊層群と沖積層が覆っている。クレータはこの堆積物に覆われている。ボーリングデータや地質調査に依れば、クレータ内部においては三豊層群より古い讃岐層群がみられる[11]。この讃岐層群は中新世に活動した火山活動による瀬戸内火山岩類とそれに伴う淡水性の堆積層からなる。あとで述べるように、この火山岩類が存在することが、この高松クレータが火山性の成因を持つとする見解の重要な根拠になっている。

瀬戸内火山岩類の分布と高松クレータの位置を図5に示してある。この図から分かるように、クレータは瀬戸内火山岩類が広く分布している領域の中にあ

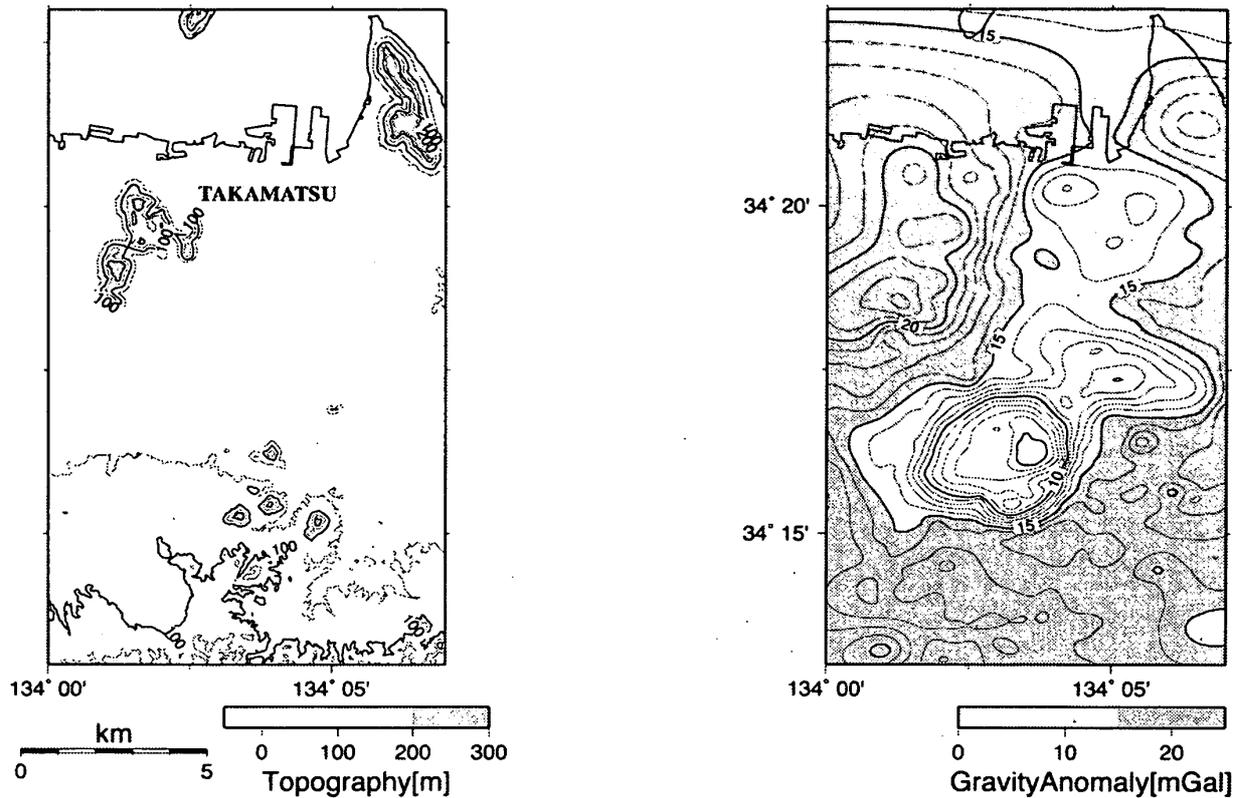


図4：高松クレータ付近の(A)地形と(B)ブーゲ重力異常分布。ブーゲ重力異常図の中央やや下よりの丸い円形状の負異常域がクレータに対応している。地形図上では全くクレータの兆候が見られない。

る。上で述べた比高200m程度の山はこうした火山岩の噴出した名残であり、クレータ内部にも数個のこうした小山ができています。ただし、現在の地質をみる限りクレータの周りに大規模な火山体があったという痕跡はみられない。クレータ内の小山もクレータ形成後に噴出した物である。また瀬戸内火山岩類の分布をみる限り、香川県付近での活動中心はクレータより北部にあるように見える。

河野他[7]は高松クレータの成因として、隕石衝突、カルデラ跡(コールドロン)、そして火山性ではない構造運動による陥没、の三種類の可能性を検討した。このうち三番目の成因は、クレータを形づくるような大きな断層がないことから、その可能性は小さいとした。そして、この地域にはコールドロンに伴うような大規模な火砕流堆積物や火山体の痕跡が認められないことなどから、コールドロンよりも隕石孔である可能性が高いのではないかと提案した。さら

にMiura et al. [13]はクレータ南部に分布する火砕流堆積物中の黒色ガラス中に、高密度石英、ラメラ状石英、そしてNi-Fe粒子等が存在することを示し、高松クレータが隕石孔であることを積極的に主張し

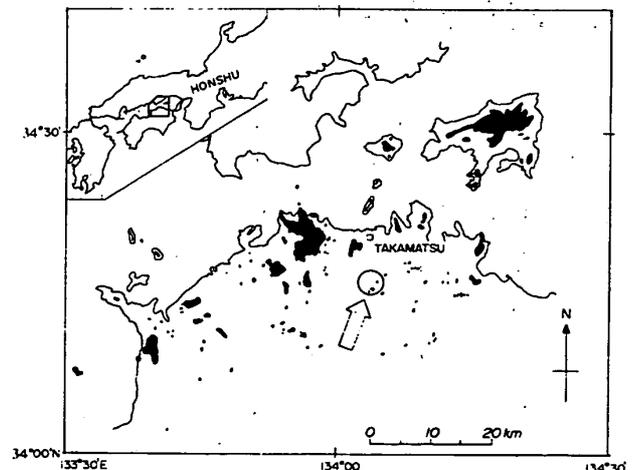


図5：四国北部における瀬戸内火山岩類の分布と高松クレータ。黒い部分が瀬戸内火山岩類分布域[12]、矢印で示された円がクレータの位置と大きさを示す。

ている。

一方、長谷川・石井[11]は付近の火山噴出物の分布やクレータ内部で得られたボーリングデータが厚い火砕流堆積物を示していることに注目して、コールドロン説を展開している。さらに、山田・佐藤[14]は火砕流堆積物中の黒色ガラスの分析を行い、ガラスの成因が火山活動であることを示している。

従来、この地域では大規模な火砕流の存在は指摘されていなかったが、瀬戸内火山区全体を見渡すと、愛知県の設定楽コールドロンや愛媛県の石鎚山コールドロン等がみられる。よって高松付近でもコールドロンが存在していても不思議ではないという指摘もある[14]。しかしながら、地質学的にみてほぼ同時期に形成されたコールドロンが、ある地域では明瞭であるにもかかわらず、高松付近ではその痕跡が花崗岩中に残された孔だけになっているという大きな差が何故生まれるかは不明である。

以上のような状況から、高松クレータの成因については、現時点ではまだ隕石孔とコールドロンのどちらとも決着が付いていないと言うべきであろう。今後ボーリング資料や更なる地質学的調査等によって、衝突を示す確実な証拠が発見されれば、日本で最初に確定される隕石孔となる可能性をもっているが、それは今後の研究にかかっている。

6. 隕石孔を探そう

日本の地質構造の発達史や激しい浸食などの悪条件から、隕石孔の発見は絶望的であるとして、始めからあきらめている研究者が多いようである。しかしながら、最初に議論したように、日本においても比較的新しい隕石孔や地下に埋没された隕石孔が発見できる可能性は高いと考える。我々は、多くの研究者や惑星科学に興味を持つ人たちが隕石孔の存在を意識して、野外調査やデータを検討することで、日本でも隕石孔が見つかることを確信している。特に最初の一個が見つかる、刺激を受けたりその

現実性を認識することで、他の事例が続々と見つかるようになることは、いろいろな分野で目撃していることである。

日本において隕石孔が発見されることは、惑星科学的にみて意義深い事と考える。その理由の一つは地殻活動が盛んな地域でも隕石孔が発見できることを示せ、多くの発見の呼び水になることである。また、第二には実際の隕石孔の研究を国内で行える様になることで、隕石孔ひいては天体衝突現象の研究をもっと身近にすることができるようになることである。これらによって、天体衝突現象の理解がより一層進むようになると期待される。

表1でもみられるが、沖縄地方には星窪という地名が多いという[4]。この名前は隕石孔に興味を持つ人だけでなく、多くの人の想像力をかきたてるのではないだろうか。その想像力をたくましくして、「星窪」を探そうではないか。

参考文献

- [1] Natural Resources Canada, 2002, <http://gdcinfo.agg.emr.ca/crat>.
- [2] Goudie, A., 1995, *The changing Earth*, Blackwell.
- [3] Morota, T., M. Furumoto, 2002, *Sci. Rep. Kanazawa Univ.* (in press).
- [4] 篠田皎, 2000, *地学研究*, 50, 183.
- [5] Graham, A. L. Et al., 1985, *Catalogue of Meteorites*, British Museum.
- [6] 坂元正夫, 1994, *地球惑星科学関連学会合同大会予行集*, E21-P33.
- [7] 河野芳輝ほか, 1991, *地震学会1991秋季大会講演予行集*.
- [8] Kono, Y. et al., 1994, *Proc. 27th ISAS Lunar Planet. Symp.*, 67.
- [9] 直井幹夫, 1997, *中日新聞*, 6月1日付.
- [10] 長谷川修一ほか, 1988, *応用地質学会中国四国支部平成10年度発表会論文集*, 63.

- [11] 長谷川修一, 石井秀明, 1996, 高松クレータの謎をさぐる, 河野芳輝監修, 四国新聞社.
- [11] Sato, H. 1982, *Sci. Rep. Kanazawa Univ.*, 27, 13.
- [13] Miura, Y., et al., 1995, *Lunar Planet. Sci.*, XXVI, 987.
- [14] 山田涼子, 佐藤博明, 1998, 岩鉱, 93, 279.