

衝突 (チツチュルブクレーター) による環境変動の調査研究

Study on the Chicxulub crater and global environmental change due to the K-T impact event

研究代表者 東京大学大学院理学系研究科 助教授 松井 孝典
Assoc. Prof. of Graduate School of Science, Univ. of Tokyo, Takafumi Matsui

共同研究者 東京大学大学院理学系研究科 助手 田近 英一
Res. Assoc. of Graduate School of Science, Univ. of Tokyo, Eiichi Tajika
東京大学大学院理学系研究科 助手 金嶋 聡
Res. Assoc. of Graduate School of Science, Univ. of Tokyo, Satoshi Kaneshima
東京大学海洋研究所 学術振興会特別研究員 清川 昌一
Post Doctoral of Fellow Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo, Shioichi Kiyokawa
東海大学情報技術センター 所長 坂田 俊文
Prof. of Research Institute for Information Technology, Univ. of Tokai Toshifumi Sakata
ブラウン大学 地質学教室 教授 P. H. Schulz
Prof. of Geological Inst., Brown Univ, P. H. Schulz
メキシコ自治国立大学 地球物理学教室 教授 J. Oscar. Campos Enriqueg
Prof. of Instituto de Geofisica, Universidad Autonoma de Mexico, J. Oscar. Campos Enriqueg
メキシコポリテクニコ大学 技術建築学教室 教授 Roberto Hernandez Auniga
Prof. of Esquella Superior de Ingenieria y Arquitectura, Instituto Politecnico Nacional, Roberto Hernandez Auniga

To study the structure of the Chicxulub crater, Yucatan, Mexico, we have performed the seismic refraction study and the heat flow measurement of this area. Although we have not yet finished the analysis of seismic record, we found the heat flow anomaly in the Chicxulub crater. This new discovery suggests that the depth of transient crater of the Chicxulub crater reaches the bottom of the continental crust and subsequent uplift of the mantle causes a large scale disturbance of the temperature field of this region. This constrains the distribution of impact energy and is very useful to infer the global environmental change due to this K-T boundary impact.

研究目的

今から6,500万年前, それまで長いあいだ繁栄を誇っていた恐竜が, 突然絶滅した。この時, 恐竜だけでなく他の多くの生物も同時に絶滅している。このような現象を, 生物の「大群絶滅」と呼ぶ。なぜ恐竜など当時の生物の多くが絶滅したのかについては, 不明であった。しかし, 1980年になって恐竜が絶滅した地層(K/T境界層という)から地球表層にはほとんど存在しないイリジウムという元素が多量に濃集していることが発見され, 直径10kmを超える巨大な隕石が地球に衝突した結果, 恐竜をはじめとする生物の大群絶滅が引き起こされたのではないかと考えられるようになった。衝突によって形成されたと考えられるクレーターは, 1991年になって, ようやく特定された。そのクレーターは, チツチュルブ・クレーターと呼ばれ, メキシコのユカタン半島に位置している。その直径は180km(実際には300kmあるという説もある)という。地球上で最大であるばかりでなく, 太陽系でも過去30億年というタイムスケールで見れば最大級の巨大クレーターである。

恐竜を含む生物の大群絶滅を引き起こした衝突現象とは, 一体いかなるものであったのだろうか? たとえば, 直径10kmの天体が地球に衝突すれば, 厚さ30km程度の大陸地殻は簡単に破壊され, その影響はマントルにまで達するであろう。したがって, この衝突によってメキシコ湾からカリブ海付近の地質構造(テクトニクス)は多大な影響を受けた可能性が高い。一方で, そのような衝突は巨大地震を引き起こすため, 大津波が発生したことが予想される。実際, そのような津波の証拠が, すでにメキシコ湾及びカリブ海沿岸域で発見されている。地震波は, 地球の反対側に収束し, そこに大規模な地殻変動をもたらす可能性もある。さらに, 衝突によって大規模な気候変動をもたらされたはずである。たとえば, 衝突時の爆風は付近1000kmくらいの範囲に衝突の直接被害をもたらすし, 地球圏外に放出された破片は大気圏に再突入し, 大気を加熱する。その熱は地表を焦がし, 地球全体で大規模な森林火災が発生する。その証拠が各地で発見されている。また, 衝突によって上空まで巻き上げられた塵や森林火災によって発生したすすは, 数カ月～数年程度大気中にとどまって太陽光線をさえぎる。

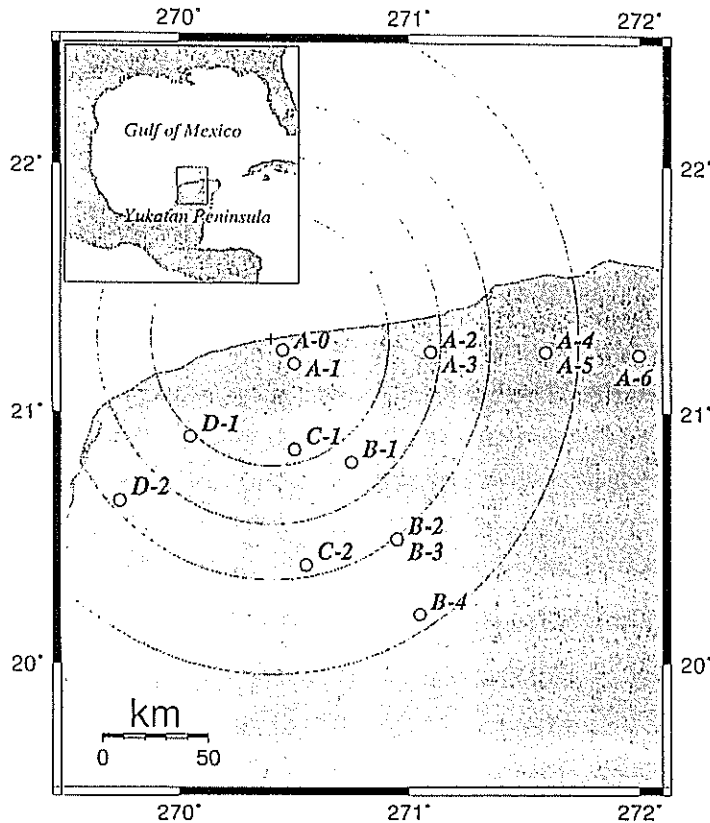


図1 調査地域の概要

研究成果

巨大隕石衝突による地球環境の変動は解放された衝突エネルギーに依存している。例えば直径180kmのクレーターの場合、かつての米ソの冷戦時代の全核弾頭を爆破させたエネルギーの1万倍以上に達し、300kmとすると10万倍以上となる。本研究ではしたがってユカタン半島における各種の物理探査によりクレーターの直径及び衝突角度など衝突条件を決定することを主たる目的とした。現在までに測定が終了し解析結果が得られているものは地殻熱流量探査のみである。地震屈折波探査についてはその実施が本年2月にずれ込み、終了は3月にかかったこともあり、現時点ではまだその解析結果が得られていない。従って以下では研究実施過程で新たな着想を得て実施され、実質的には本研究におけるこれまでの最大の成果ともいえる地殻熱流量測定の実績について述べる。

地殻熱流量とは地球内部から地表に流出する熱流量のことである。巨大隕石衝突により大量の衝突エネルギーが熱として地下に埋め込まれる他、地殻に穴があき、アイソスタシー的回復運動によりマントルが上昇するため地下の温度場は大きな擾乱を受ける。このためクレーターの内部、あるいは周辺部での地殻熱流量は、周囲のそのような擾乱を受けていない地域の熱流量とは異なることが予想される。本研究ではクレーターの中心からの距離に応じて地下の温度分布がどのように変化しているかを測定した。その結果地下の温度勾配は中心付近急で、中心から遠ざかるほど緩やかになっていることが分かった。地殻熱流量は、温度勾配にその構成物質の熱伝導率を乗じて得られる。現地でも回収した岩石の熱伝導率を測定し、それを用いて計算された地殻熱流量の測定値を図2に示す。地下40mでの温度が中心からの距離によってどう変化するかの測定値も同様に示す。また表1に測定結果の概要を示す。図2から明らかなようにクレーターの内部の地殻熱流量は周囲の地域のそれに比べて高いことがわかる。この地殻熱流量の異常はクレーターの構造に関連したものと予想される。その詳細は今後クレーター形成後の熱的進化のシミュレーションを行い解明する予定である。しかし現時点ではこの熱流量異常がクレーターの形成に伴って生じた温度場の変化あるいは地下構造を反映したものであることを否定する理由はない。

簡単な熱史の計算から、6500万年経過した現在でもこのような地殻熱流量の異常が観測されるためには、当時の温度場の擾乱がかなりの規模に及ぶ必要があることがわかる。すなわち、クレーター形成直後にはクレーターの底は大陸地殻を突き抜け、マントル上部に達する程の規模であったと予想される。この場合クレーターの衝突エネルギーは米ソ冷戦時の全核弾頭の爆発エネルギーの10万倍以上であったことが示唆される。

この結果、衝突直後の地球は全球的に寒冷化し、植物は光合成活動を行なうことができなくなり、食物連鎖の結果として大型生物が絶滅していった可能性が考えられる。もっと直接的には衝突によって大気中に多量の有害物質（シアン）が形成される可能性がある。また、 NO_x 、 SO_2 も形成されるから現在の環境問題で指摘されるよりもっと深刻な酸性雨問題が生じたはずである。 NO はオゾン層を破壊し、また SO_2 は成層圏内で硫酸の液滴をつくる。この硫酸のもやは10年という時間スケールで成層圏に漂い、入射太陽光をさえぎる。その減光量は植物が光合成を行えないレベルに達し、生態系への影響は従来考えられていたよりもっと長くなる。さらに、この衝突は浅い海底で起こったため石灰岩を主成分とする堆積岩が一瞬のうちに蒸発し、大量の SO_2 や CO_2 が放出される。この結果、気候は衝突の冬のと温暖化し、生態系に長期的な影響を与えたことが予想される。重要なのは、これらの環境変化はすべて、現代における地球環境問題と本質的に全く同じであるということである。ただし桁違いに大きい。

上述したようなテクトニクスや気候変動に対する衝突の影響は、その衝突規模（たとえば、どのくらいの速度で衝突したのか）や衝突の物理条件（たとえば、真上から衝突したのかそれとも斜めから衝突したのかなど）によって大きく異なることが予想される。したがって、これらの問題を解明するためには、チクチュルブクレーターの現地調査を行い上記の量を決定することが必要となる。ところが、クレーターが形成された地域は当時海底であったため、現在のクレーターはその後に堆積した石灰岩によって、厚さ2kmにもわたって覆われている。したがって、チクチュルブクレーターの調査を行なうためには、地面に深い穴を掘ることによって直接その地下構造を調べるか、または地下でダイナマイトを爆発させることなどによって人工的に地震を起こし、発生した地震波の伝播経路を解析して地下構造を調べることになる。ところが、これはどちらも大変な経費がかかる調査であるため、これまでほとんど実現されることがなかった。この結果、地球史上最大級のカタストロフィック・イベントである天体衝突の実態については、未だ明らかにされないままになっているのが現状である。本研究は世界に先駆けて現地において各種の地球物理探査を行い、6500万年前の巨大隕石衝突の規模と物理条件を推定し、その結果得られる衝突エネルギーに基づいて地球システムに引き起こされる擾乱の規模を推定することを目的とする。

研究経過

本助成金による研究期間は、1995年4月から1997年3月までの2年間であった。その期間のほとんどは現地（メキシコ・ユカタン半島）における地震屈折波探査及び地殻熱流量探査のための各種の準備に費やされた。最終的に現地においてダイナマイトの爆破により人工地震を起し、その地震記録を記録したのは1997年2月である。以下にその経緯をまとめる。

本研究は、日本（東大）、アメリカ（ブラウン大）、メキシコ（メキシコ自治国立大学 他）による3カ国共同研究である。1995年12月、メキシコ・エンセナーダ市において本研究プロジェクトの実施計画と進捗状況、今後の見直しについての計議が行われた。その結果、軍による爆破の許可を得るのに当初の予定より時間がかかることがメキシコ側より報告された。その際、1回の爆破のダイナマイト量について当初の予定より2倍近い500kgという提案がなされた。薬量は多いという意見もあったがとりあえずその予定で計画を進めることにした。測線については求めたい地下構造や地表付近の道路分布、地主との交渉などの諸条件を総合的に判断し、図1のA-3とA-4、A-5とA-6、B-1とB-2、C-1とC-2、C-3とC-4を結ぶ5本の測線（以下それぞれの測線をA2, A3, B1, C1, C2と略す）が提案され了承された。その際予算的に可能ならば、A-1とA-2、B-3とB-4、D-1とD-2を結ぶ3本の測線（以下同様にA1, B2, D1）についても実施できるよう努力することを申し合わせた。

1996年夏に爆破の許可が得られそうだとの情報メキシコ側の研究者からもたらされ、穴の掘削を夏までに完了するよう計画した。その間に、研究費の大部分が掘削費であることから爆破前に掘削孔を有効利用することを考え、その掘削孔を用いて地殻熱流量の測定を行うこととした。当初地震探査用のダイナマイト爆破のための孔の深さとしては40m程度を予定し、実際に掘削が完了したのはその深さまでであった。しかし地殻熱流量測定のためには浅く、50mまで掘削することとし、2本については100mまで掘削することとした。なお、追加の3本の測線の孔の掘削とより深くするための費用については追加の費用を必要とし、それについては研究代表者への他からの寄付金を用いた。結局1996年夏までに径200mm程度の深さ50mの掘削孔12本と深さ100mの掘削孔2本を掘り終えたので、1996年夏に地殻熱流量の測定を行った。人工地震については使用する爆薬の種類の変更などのため許可申請を再度行うことが必要となり、その許可が得られ次第地震屈折波探査を行うこととした。地殻熱流量については、測定の結果異常な熱流量を発見したので、1996年冬と1997年2月にも追加の測定を行った。

人工地震による地震屈折波探査は1997年2月に実施した。予想される地下のクレーターの縁を横切る測線としてA1, A2, A3, B1, B2, C1, D1の7本の測線を予定したが、B1, B2, C1, D1の測線については掘削孔が30m位で地下の空洞と思われる所に達していることが地殻熱流量測定の際発見された。そのため500kgのダイナマイトを爆発させることにより付近の地域が陥没する恐れがあることから今回の爆破は見送ることとした。1997年2月段階ではしたがってA1, A2, A3の測線について爆破を行い、これらの測線について地震波記録を得た。

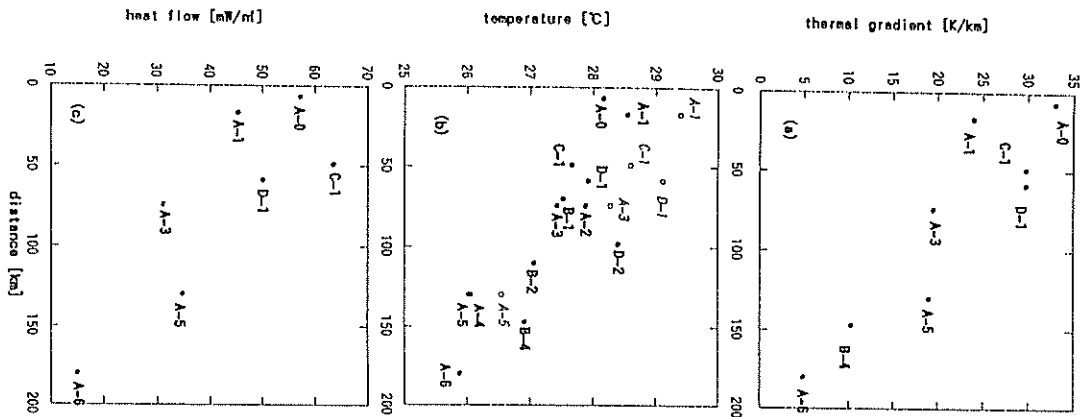


図2 地殻熱流量，温度（地下40m），地下の温度勾配の中心からの距離による変化

Table 1. Summary of Heat Flow Measurements

Location	Hole No.	Distance [km]	Date of Drilling	Date of Measurement (*1997)	Depth [m]	Thermal Gradient [K/km]	Thermal Conductivity [W/mK]	Heat Flow [mW/m²]
Chicxulub	A-0	7	11/28	12/8, 2/1 *	39	33.0	1.73	57
Chicxulub	A-1	17	12/2	12/8, 15, 2/1 *	88	24.1	1.88	45
Temax	A-3	74	12/6	12/11, 14, 16, 2/2 *	98	20.7	1.60	32
Sucila	A-5	130	12/7	12/9, 2/2 *	96	19.5	1.83	36
Tizimin	A-6	180	6/20-22	7/28, 12/9, 2/1 *	50	4.9	3.07	15
Tahdziu	B-4	147	7/29	2/5*	48	10.3		
Timucuy	C-1	49	12/15-16	12/18, 1/31, 2/6 *	97	29.8	2.13	63
Kinchil	D-1	59	12/10	12/13, 2/4 *	99	29.8	1.68	50

今後の課題と発展

今回の調査研究は巨大隕石の衝突がもたらす地球環境の変動の解明の第一歩にすぎない。例えば今回の調査により発見されたチクチュルブクレーターの地殻熱流量異常は、これまで報告されたことがない新発見である。その詳細の解明は今後の重要な課題である。それは巨大隕石の研究により解放されるエネルギーの分配について大きな制約条件を与え、地球環境変動の規模の推定にも影響する。

また、今回の調査期間中、文献調査を通じてキューバの6500万年前の地層が極めて異常な特徴を有することがわかった。そのためユカタン半島における調査と平行してキューバでの6500万年前の地層の調査研究の準備をしつつある。1997年1月に実施した予備調査ではそれが津波堆積層であるらしい証拠を発見した。将来この地層中に、衝突によって生じた地球環境の変動を記録した地質学的証拠が発見される可能性が高い。これも今後の研究の重要な課題である。

これらの研究を通じて地球及び生命の歴史が、従来考えられていたようなゆるやかに変化する現象に支配されたものではなく、もっとずっと破局的な事件によって支配されることが明らかになりつつある。それは従来地球史や生命史のパラダイムの変更を余儀なくさせる。本研究は従来とは異なる全くの新しい分野の研究へと発展する萌芽的な研究といえる。

発表論文リスト

現段階では、投稿中（例えば Matsui et al., Heat flow anomaly in the chicxulub crater, submitted to Nature）、準備中のものでばかりで発表済みのものはない。

なお、一般向けの解説としては例えばニュートン3月号(1997)の特集などがある他、9月末刊行の単行本として「恐竜絶滅のメッセージ」（松井 孝典 著、ワック出版部発行）がある。