

キューバ北西部ベニャルベル層に見られるK/T境界津波堆積層の形成機構

後藤和久*・田近英一*・多田隆治*・松井孝典*****・M. A. Iturralde-Vinent**・
清川昌一***・中野陽一郎*・山本信治*・大路樹生*・高山英男****

1. はじめに

今から約6500万年前の白亜紀/第三紀境界(以下K/T境界)に、直径約10kmの地球外天体が地球に衝突したという説(Alvarez et al. 1980)は、世界中に分布するイリジウムの異常濃集層や、メキシコ、ユカタン半島北西部の地下における直径約180kmの衝突クレーター(以下チチュルブクレーター)の発見(Hildebrand et al., 1991)によって、現在では広く受け入れられている。チチュルブクレーターの発見後、K/T境界に関する研究は衝突の規模や様式、および衝突が地球表層環境に与えた擾乱の解明に重点が置かれるようになった(例えばRyder et al., 1996, Smit et al., 1999)。津波は、衝突の結果引き起こされる大規模な環境変動の一つである。そして、衝突直後にメキシコ湾周辺地域を襲ったとされる巨大津波に関する研究が, Bourgeois et al., (1988)をはじめとして、数多くなされている(例えばSmit et al. 1996, Smit, 1999)。しかし、これらの堆積層が重力流により形成されたとする説(Bohor, 1996)もあり、津波堆積層の起源や形成メカニズムについては依然として議論が続いている。また、津波堆積層に関する研究は、これまで浅海性堆積層についてのみ行われており、深海性堆積層の報告例はほとんどなかった。このため、衝突現象およびそれに付随した海洋の擾乱が、深海

底にどのような影響を与えたのかについては良くわかっていない。

1997年以来、我々日本とキューバの共同研究グループは、衝突地点に最も近い陸上露頭の一つであるキューバ西部に分布する、K/T境界層の調査を行ってきた。その成果の一部は、Takayama et al. (2000)によってすでに公表されている。Takayama et al. (2000)によれば、首都ハバナ周辺に分布するベニャルベル層は、従来報告されているK/T境界層の中で最も厚い堆積層(層厚約180m)の一つである。また、同層は従来情報が不足していた衝突地点の東側の深海底に堆積しており、その堆積メカニズムを研究することによって、衝突直後の地球表層環境の擾乱の様子を高い時間解像度で引き出す事が出来ると期待される。

Takayama et al. (2000)によれば、模式地のベニャルベル層(層厚約180m)は、下部の浅海起源の重力流堆積物(25m)と、上部のホモジェナイト(約150m)から構成され、下部の重力流堆積物は、衝突に伴う地震波により引き起こされたと考えられている。ホモジェナイトとは、厚く、均質で、上方細粒化傾向を示す堆積物の総称で、砂~シルトサイズの粒子が懸濁状態から単純沈降して形成された深海性津波堆積層であると考えられている(Kastens and Cita, 1981, Cita et al., 1996, Cita and Aloisi, 2000)。Takayama et al. (2000)は、その特徴の類似から、ベニャルベル層のホモジェナイトも、衝突によって発生した津波によって形成された高密度懸濁水から懸濁粒子が単純沈降して堆積した深海性津波堆積層であると解釈した。しかし、ベニャルベル層のホモジェナイトは層厚や粒度などが地中海のホモジェナイトとは異なり、

*東大・理・地球惑星

**キューバ国立自然史博物館

***九大・理・地球惑星

****NHK名古屋

*****東大・新領域

より詳しい特徴の記述と堆積メカニズムの解明が必要である。そこで本研究では、ベニヤルベル層のホモジェナイトの堆積構造や粒度・鉱物組成の詳細な分析を行い、同層の堆積メカニズムの検討を行った。

2. 地質概説と調査地域

現在のキューバ島は、複数の地質構造帯からなっているが、ベニヤルベル層が堆積している白亜紀キューバ島弧は、衝突当時には現在よりおよそ500km南に位置し、キューバ島弧とバハマ地塊との間には、大西洋とメキシコ湾をつなぐ深海が広がっていたと考えられている。白亜紀キューバ島弧はその後北上し、始新世末までにはバハマ地塊に衝突付加したと考えられている(図-1, Rosencrantz, 1990, Bralower and Iturralde-Vinent, 1997)。ベニヤルベル層は、白亜紀後期の堆積物であるピアブランカ層を不整合に覆っており、晩新世のアポロ層に不整合に覆われている。ピアブランカ層やアポロ層は、主に半

深海性の泥質岩からなり、しばしば珪酸塩粗粒砕屑物からなるタービダイト層を挟む。ピアブランカ層の推定堆積水深は浮遊性有孔虫と底生有孔虫の割合から、600m~2000m程度と考えられている(Bronnimann and Rigassi, 1963)。

3. 岩相層序

首都ハバナ近郊のベニヤルベル層の模式地は、層厚が180m以上で、主に石灰質砕屑岩からなり、石灰質礫岩~石灰質シルト岩へと上方細粒化傾向を示し、下位のピアブランカ層を凹凸のある侵食面で覆っている(図-2)。生物擾乱の痕跡は、全層に渡って見られない。ベニヤルベル層は、成因の違いから下部ユニットおよび上部ユニットに区分される(多田・松井, 1999)。上部ユニットは粒度の違いから、さらにサブユニットA(石灰質砂岩)、サブユニットB(石灰質シルト岩)に区分される。

下部ユニットの層厚は25mで、均質で粒度

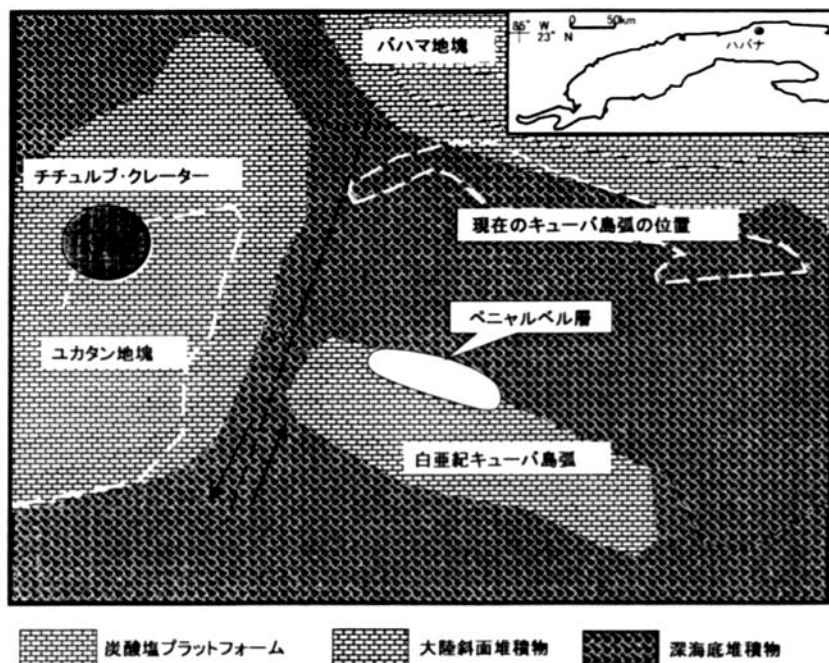


図-1 白亜紀末キューバ周辺の古地理図および調査地点(図中黒丸)の位置図(現在のユカタン半島とキューバ島の位置は点線で示されている)

変化の無い石灰質細礫岩からなり、直径～1 mにも及ぶピアブランカ層起源の泥岩同時礫を取り込んでいる。細礫は淘汰が悪く、粒子支持で、円磨された厚歯二枚貝や浅海性石灰岩片を多く含む。

上部ユニットの層厚は150m以上で、サブユニット A は灰色の中粒～細粒石灰質砂岩からなり、塊状で淘汰が良く、単一の上方細粒化傾向を示す。この部層に含まれる微化石は、主に半深海～深海性の浮遊性及び底生有孔虫

で、下位のピアブランカ層起源と考えられている (Takayama et al., 2000)。サブユニット A の下部には、緑灰色で淘汰が良く、円磨された泥岩片を主とし、少量の厚歯二枚貝片及び浅海性の石灰岩片を含む薄礫層が36枚狭在している。また中部には、堆積物が急速に堆積したことを示す、シリンダー状やシート状の脱水構造 (図-3, Lowe, 1975) が頻繁に観察される。シリンダー状の脱水構造は、特定の層準に集中して見られ、5層準が確認

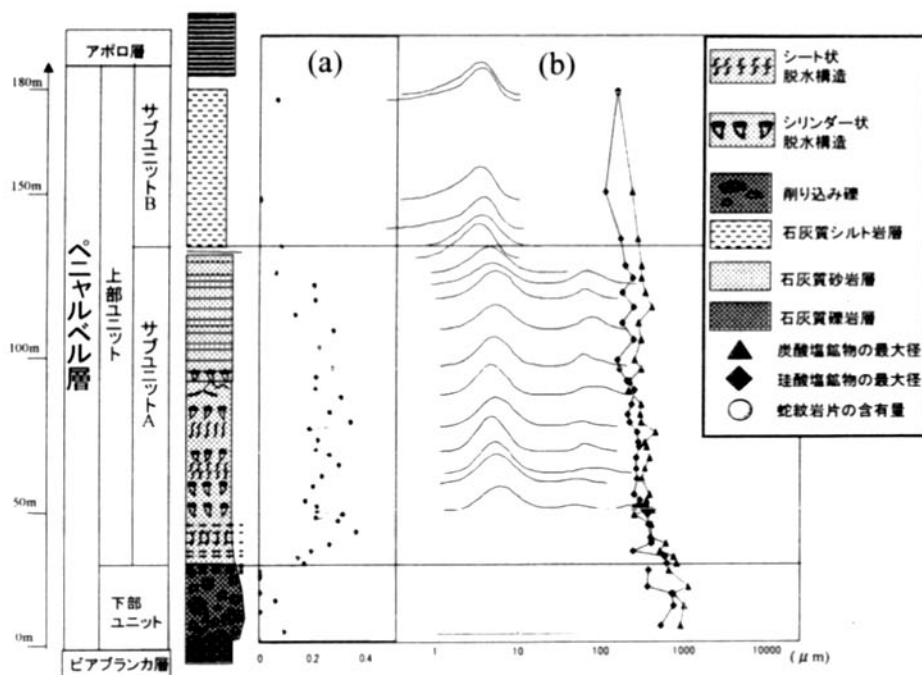


図-2 ベニヤルベル層の模式柱状図および、(a) 内部試料により規格化した蛇紋岩片の含有量の変動パターン、(b) 粒度分布および炭酸塩・非炭酸塩鉱物の最大粒径 (μm)

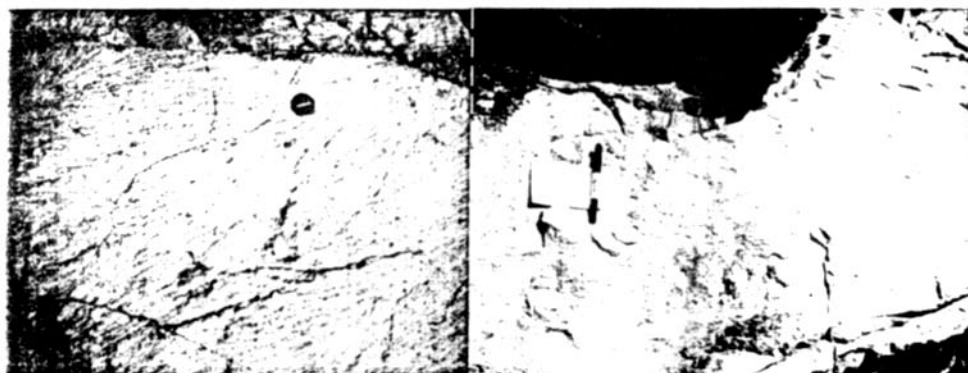


図-3 サブユニット A の中部に見られる、シート状およびシリンダー状の脱水構造

されている。一方、上部には、脱水構造は見られず、弱い平行層理が観察される。サブユニット B は、層厚40m以上の塊状、均質な石灰質シルト岩からなる。同ユニットには直径1 cm以下の泥岩片や、直径3 cm以下の黒色頁岩片が少量含まれている。

4. 分析手法

本研究では、上部ユニットの堆積メカニズムを明らかにするために、鉱物組成および粒度分布の計測を行い、その相互関係を調べた。まず薄片観察により、粒子組成を定性的に調べたのちに、各ユニットの鉱物組成の変動パターンを調べるため、X線粉末分析を行った。バルク試料の70~90%は方解石からなるため、微量しか含まれない粘土鉱物や碎屑性鉱物の検出ができないう問題がある。そこで、これらの鉱物について調べるため、20%酢酸で方解石を除去した溶解残さを用いて分析を行った。また、内部標準試料として5g%の粉末シリコンを用い、内部標準法により各鉱物含有量の定量化を行った。

堆積メカニズムを考える上で、粒度は重要な情報となる。しかし、堆積物が固結しており、そのままでは粒度の測定が困難なため、

10%塩酸および10%過酸化水素によって炭酸塩鉱物と有機物を除去し、その溶解残さを用いて、レーザー式粒度分析器（ホリバLA-920）により粒度分析を行った。また、最大粒径については、薄片を用いて顕微鏡下で炭酸塩鉱物及び碎屑性の珪酸塩鉱物の最大粒径を計測した。

5. 分析結果

5-1. 粒子及び鉱物組成

薄片観察によると、下部ユニットは淘汰が悪く、主に中礫~細礫サイズの浅海性の大型化石片からなり、粒子支持である。非炭酸塩鉱物は、主に泥岩片、変質火山岩、石英、長石などからなる。一方、上部ユニットでは、浅海性の大型化石片はほとんど見られず、浮遊性および底生有孔虫が卓越する。微細粒子からなる石灰岩片中には、微細な石英や粘土鉱物が含まれている様子が観察される。非炭酸塩粒子は、主に泥岩片・石英・長石・火山岩片などからなるが、サブユニット A では、蛇紋岩片が卓越する（図-4）。Takayama et al. (2000) によると、サブユニット A における蛇紋岩片は、全非炭酸塩鉱物の50%以上を占める。



図-4 サブユニット A 中に特徴的に含まれる、メッシュ構造を持つ蛇紋岩片

ベニャルベル層下位のピアブランカ層中に見られる砂岩（タービダイト起源）は、微細粒子からなる石灰岩片が中心で、わずかに石英や火山岩片が観察されるが、蛇紋岩片は観察されなかった。また、サブユニットAの下部に取り込まれている、下位のピアブランカ層起源と考えられる礫岩中にも蛇紋岩片は観察されなかった。

X線粉末分析によると、溶解残さは、石英、粘土鉱物、蛇紋岩片、ドロマイト、斜長石などからなる。蛇紋岩片やドロマイトは、石灰質砂岩からなるサブユニットAに特徴的に見られる。いずれの鉱物の含有量も、サブユニットAにおいて5回以上揺らいでおり、その傾向は特に蛇紋岩片含有量に顕著に見られる（図-2a）。下位のピアブランカ層中の砂岩および、ピアブランカ層起源と考えられているサブユニットA中の取り込み礫には石英や粘土鉱物が多く含まれるが、蛇紋岩片は検出されなかった。

5-2. 粒度分布及び最大粒径の変動パターン
サブユニットAの溶解残さは、バイモーダルな粒度分布を示す（図-2b）。細粒モードのモード径はほぼ $8\mu\text{m}$ で、薄片観察の結果から、石灰岩片中に取り込まれている石英や粘土鉱物粒子が溶け残ったものが中心である。そのため、溶解残さの細粒モードの量は石灰岩片の量を反映していると言える。一方、粗粒モードのモード径は約 $60\sim 130\mu\text{m}$ で、蛇紋岩片や石英などの砕屑性の粒子からなり、これら2つのモードの体積比も繰り返し変動し

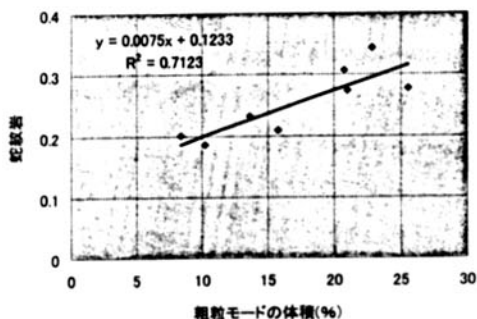


図-5 蛇紋岩片の含有量と溶解残さの粗粒モードの体積の相関

ている。サブユニットBの粒度分布はユニモーダルで、モード径は約 $6\mu\text{m}$ ではほぼ一定である。

炭酸塩鉱物の最大粒径は、全体的には上方細粒化する傾向にある。下部ユニットは浅海性の大型化石片が中心で、約 $700\sim 1000\mu\text{m}$ である。それに対して、上部ユニットは浮遊性および底生有孔虫が中心で、約 $250\mu\text{m}$ を中心として変動が見られる。珪酸塩鉱物の最大粒径は、下部ユニットから上部ユニットにかけて緩やかに細粒化するが、上部ユニットでは、約 $250\mu\text{m}$ 付近で変動しながら徐々に減少する。

5-3. 組成と粒度分布の相関

粒度分析の結果、溶解残さの2つの粒度モードの体積比にも小さな変動が見られることが明らかになった。そこで、溶解残さの鉱物含有量の揺らぎと、溶解残さの粗粒モードの体積との関係を調べたところ、これら間には良い正の相関が見られ、特に蛇紋岩との相関が良いことが明らかになった（図-5）。

6. 堆積メカニズム

ベニャルベル層の下部ユニットは、下位の地層を侵食している点や、級化が悪く粒子支持であること、下位のピアブランカ層の同時礫を取り込んでいること、浅海性の大型化石片からなる事などから、Takayama et al. (2000) が指摘したように、浅海性の炭酸塩プラットフォームを起源とする重力流堆積物であると考えられる。それに対し、上部ユニットは巨視的には均質で淘汰が良く、上方細粒化を示し、侵食や流れを示す構造が全く見られないなど、ホモジェナイトの特徴を備えている。

しかし、本研究において溶解残さの鉱物組成を詳細に調べた結果、蛇紋岩をはじめとする鉱物の含有量が5回以上繰り返し変動していることが明らかになった（図-2a）。一方、サブユニットAの溶解残さの粒度は、石灰岩片中に取り込まれている石英や粘土鉱物が中心の細粒モードと、蛇紋岩片や石英など

の碎屑性の粒子からなる粗粒モードからなるバイモーダルな分布を示し、その体積比も繰り返し変動している(図-2b)。このような、上部ユニットに見られる粒度と連動した鉱物組成の揺らぎは、肉眼では確認できないほど弱いものである。さらに、鉱物組成と粒度の揺らぎとの関係を調べたところ、蛇紋岩や石英などの含有量と溶解残さの粗粒モードの体積比との間に正の相関が見られることが明らかとなった(図-5)。このことから、鉱物組成の揺らぎは、石灰岩片と石英や蛇紋岩片などの碎屑性粒子の混合比の変化を反映していると考えられる。

粗粒モードの代表的な鉱物である蛇紋岩片は、ベニャルベル層下位のピアブランカ層には含まれないことから、ピアブランカ層からの再堆積だけでは説明がつかず、遠方から運搬されてきた可能性が示唆される。上部ユニットに見られる鉱物組成の揺らぎは、蛇紋岩片を含む懸濁粒子雲に石灰岩片が繰り返し側方から供給されたか、または蛇紋岩片をはじめとする粗粒粒子が繰り返し側方から供給された可能性を示唆する。流れを示す堆積構造に認められないことや、侵食痕が見られないことから、その供給メカニズムが重力流による可能性は考えにくく、津波のような大規模な水塊の移動に伴って、懸濁粒子として物質が運搬された可能性が高いと考えられる。

7. 結論

模式地におけるベニャルベル層の上部ユニットは、肉眼観察に基づく限りホモジェナイトの特徴を有する。しかし、より詳しく調べると、溶解残さの鉱物組成の弱い変動が見られ、それは石英や蛇紋岩片などの碎屑性の粒子と石灰岩片の混合比の変化を反映している。これは津波によって、どちらかの成分の粒子が側方から繰り返し懸濁水塊に注入された結果であると考えられ、ベニャルベル層は大局的には懸濁水塊から単純沈降したものの、その間に津波の影響による粗粒碎屑物の供給を繰り返し受けていたと考えられる。

引用文献

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. and Michel, H. V., 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208: 1095-1108.
- Bohor, B. F., 1996. A sedimentary gravity flow hypothesis for siliciclastic units at the K/T boundary, northeastern Mexico. In: Ryder, G., Fastovsky, D., and Gartner, S. (Editors), *Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History*. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 307: 183-195.
- Bourgeois, J., Hansen, T. A., Wiberg, P. L. and Kauffman, E. G., 1988. A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas. *Science*, 241: 567-570.
- Bralower, T. J. and Iturralde-Vinent, M. A., 1997. Micropaleontological dating of the collision between the North American plate and the Greater Antilles Arc in western Cuba. *Palaios*, 12, 133-150
- Bronnimann, P., Rigassi, D., 1963. Contribution to geology and paleontology of area of the city of La Habana, Cuba, and its surroundings. *Eclogae Geol. Helv.*, 56: 193-480.
- Cita, M. B., Camerlenghi, A., Rimoldi, B., 1996. Deep-sea tsunami deposits in the eastern Mediterranean: new evidence and depositional models. *Sediment. Geol*, 104, 155-173.
- Cita, M. B., Aloisi, G., 2000. Deep-sea tsunami deposits triggered by the explosion of Santorini (3500y BP), Eastern Mediterranean. *Sediment. Geol*, 135, 181-203.
- Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Antonio, C. Z., Jacobsen, S. B., Boynton, W. V., 1991. Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology*, 19, 867-871
- Kastens, K. A., Cita, M. B., 1981. Tsunami-

- induced sediment transport in the abyssal Mediterranean Sea. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Part I, Vol.92, p845-857.
- Lowe, D. R., 1975. Water escape structures in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, 22, 157-204
- Rosencrantz, E., 1990. Structure and tectonics of the Yucatan basin, Caribbean Sea, as determined from seismic reflection studies. *Tectonics*, 9, 1037-1059
- Ryder, G., Fastovsky, D., and Gartner, S., eds., 1996. Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in earth history. *Geol. Soc. Am. Bull. Spec. Pap.*, 307, 569
- Smit, J., Roep, Th. B., Alvarez, W., Claeys, P., Grajales-Nishimura, J. M. and Bermudez, J., 1996. Coarse-grained, clastic sandstone complex at the K/T boundary around the Gulf of Mexico: deposition by tsunami waves induced by the Chicxulub impact? In: Ryder, G., Fastovsky, D., and Gartner, S. (Editors), *Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History*. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 307: 151-182.
- Smit, J., 1999. The global stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary impact ejecta. 1999, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* Vol. 27, 75-113.
- Takayama, H., Tada, R., Matsui, T., M.A. Itrulde-Vinent., Oji, T., Tajika, E., Kiyokawa, S., Garcia, D., Okada, H., Hasegawa, T., Toyoda, K., 2000. Origin of the Penalver Formation in northwestern Cuba and its relation to K/T boundary impact event. *Sediment. Geol.*, 135: 295-320.
- 多田隆治・松井孝典：1999年，キューバ白亜紀/第三紀境界の巨大津波堆積物，*科学*，Vol. 69, No. 11, p913-919.