

白亜紀—第三紀境界における巨大隕石の衝突と生物相の変動

—— 花粉学的立場からの考究 ——

高 橋 清

放送大学長崎ビデオ学習センター

〒859-04 長崎県西彼杵郡多良見町元釜名5-15

長崎国際ソフトウェアセンター内

(1993年3月5日受理)

Major Meteorite Impact and Biotic Extinction at the Cretaceous-Tertiary
Boundary—An Investigation from the Viewpoint of Palynology—

Kiyoshi TAKAHASHI

Nagasaki Video Study Center of the University of the Air

5-15 Motogama-Myo, Tarami-Machi, Nishisonoki-Gun, Nagasaki Prefecture, 859-04

Nagasaki International Software Center

Evidence for a major meteorite impact on the earth 63 ($\pm$) million years ago is shown by the presence of meteoritic debris in the Cretaceous-Tertiary boundary claystone.

The marine claystone layers at the Cretaceous-Tertiary boundary in Italy, Denmark, and Spain reveal the extinction of planktonic foraminifera and nannofossils, and iridium anomaly.

The Cretaceous-Tertiary boundary in the Western Interior of North America is recognized by the abrupt disappearance of a few characteristic Cretaceous pollen genera, principally *Aquilapollenites* (except *A. spinulosus*) and *Proteacidites* and by the iridium anomaly indicating an extraterrestrial source. Shocked quartz grains are isolated from the Cretaceous-Tertiary boundary layers.

The Cretaceous-Tertiary boundary at Kwaruppu in eastern Hokkaido is pointed out by a major change of the foraminiferal assemblages. However, the characteristic Cretaceous pollen genera, triprojectate pollen, *Proteacidites*, *Cranwellia*, *Wodehouseia*, and *Phyllocladites*, appear across the Cretaceous-Tertiary boundary. This fact is different from the palynological evidence in the Western Interior of North America. Iridium and shocked minerals are not yet found in Kwaruppu, but expected to discover in the near future.

Key words: Cretaceous-Tertiary boundary, pollen, iridium, shocked quartz, meteorite.

ま え が き

白亜紀末に巨大隕石が地球に衝突したことにより、地球上の殆ど全ての生物が死滅し、中生代に栄えた恐竜も、この一大事変のため絶滅したという説明が、Alvarez et al. (1979⁽¹⁾, 1980⁽²⁾) により発表された。白亜紀—第三紀境界における大規模な生物相の交代の原因究明をめぐる、幾多の仮説が、これまで述べられてきているが (Gartner・McGuirk, 1979⁽³⁾; Wolbach et al., 1985⁽⁴⁾; Officer et al., 1987⁽⁵⁾; Kremp, (p.m.)⁽⁶⁾), Alvarez et al. による新説が、最も合理的に、受け入れられるように思える。したがって、この説に視点をおき、現在、日本を含めた世界各地で、この問題をめぐり、どのように研究が展開しているかを検討し、我々の研究対象である花粉学的立場に立って、意見の展望をまとめた。この小論は、第33回日本花粉学会大会 (日本花粉学会・北九州市立自然史博物館共催, 1992年10月24・25日, 北九州市国際会館) において、特別講演として、発表したものをまとめたものである。

巨大隕石衝突の実証

1) 北部イタリアの Gubbio

Alvarez et al. (1980)⁽²⁾ によれば、ローマの北約170kmのアペニン山脈の中の Gubbio の Bottaccione に、ユラ紀前期から漸新世の時代を示す遠洋性堆積物がある。K—T 境界が色々の量の粘土を含むピンク色石灰岩の中にある。この石灰岩 (Scaglia rossa 層) は、ココリスとその破片のマトリックスと多量の有孔虫殻よりなる。所により堆積物の欠如があるが、完全な所では、上部白亜紀の代表的な有孔虫 *Globotruncana* が急速に消失し、基底第三紀有孔虫 *Globigerina eugubina* によって置き換わっている。ココリスは、同じ層準で、白亜紀型が消失している。

最上位白亜紀石灰岩層と最下位第三紀石灰岩の間に、約1cmの厚さの粘土岩層がある。境界は、ピンク石灰岩が色が白くなっている最上部白亜紀の1つの帯で示される。この帯は、0.3~1.0mの厚さがあり、section から section で変る。その下位の境界は、徐々に色が変り、その上部境界は、動植物群集の消滅と一致する。Contessa では、境界の下部5mmは灰色で、上部5mmは赤色で、粘土層の中部に帯の上部境界を置く。

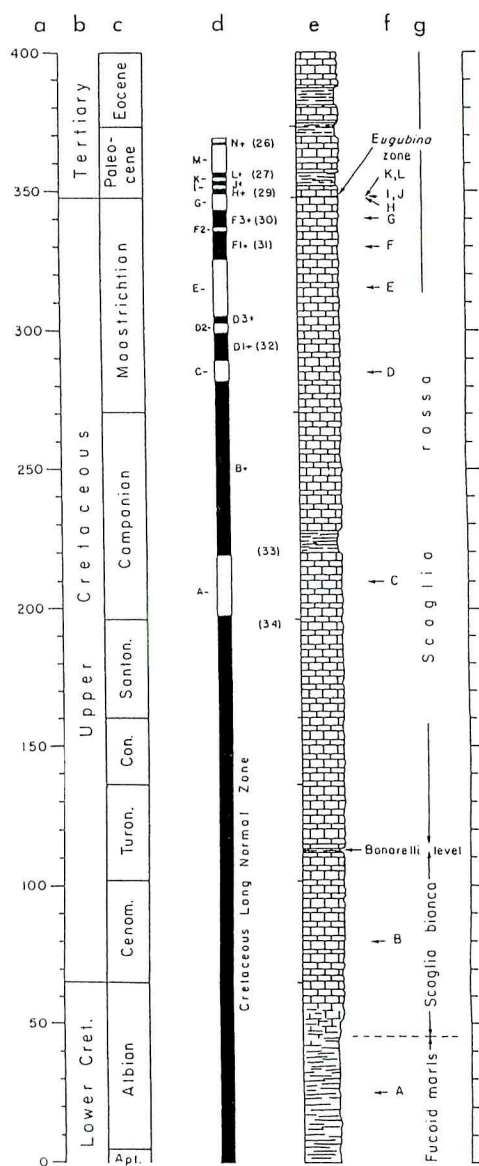


図1. イタリアの Gubbio の Bottaccione Gorge の層序断面 [Alvarez et al. (1980) による]

- a : マーター
- b : 時代
- c : 階
- d : 磁極帯 (黒—正磁極;
白—逆磁極)
- e : 岩 相
- f : サンプル番号
- g : 層 名

Gubbio の近くの Bottaccione Gorge で、有孔虫の最初の仕事が行なされた。第三紀最古の有孔虫 *Globigerina eugubina* が認められ、基底第三紀の生帯が定められた。上部白亜紀と暁新世の磁気逆転層序が確立され、海洋磁気異常順序に対比され、K-T 境界は、正磁極期29と30の間の逆磁極期にくる。大抵のナンノ化石の消滅が、*Globotruncana* 属の消滅と同一時期であることが示された。

下位から、K-T 境界をまたがるまで、12個の試料を分析し、28の要素について検討した。その中27要素は類似したパターンを示したが、Ir のみが、大変異なる振舞を示した。Ir は、通常のサンプルで ~ 0.3 ppb で境界付近の灰色粘土で4 ppb、赤色粘土で9.1 ppb であり、Ir の異常は、最高30倍にも達する。

2) デンマークの Stevns Klint

Ir 異常が、イタリアの地域的なものであるかどうかを調べるために、他の地域の同時代の堆積物を分析することが望まれた。コペンハーゲンの南約50kmの Stevns Klint の海崖が、K-T 境界と第三紀の基底の Danian の古典的地域であり、試料は Højjerup Church で採集された。

最上部白亜紀 (Maastrichtian) は黒色チャート塊を含む起伏のある白色チョーク層である。これらの起伏は、コケムシ類のバンクを示すと考えられる。K-T 境界は、魚粘土 (Fiskeler, fish clay) で特徴づけられており、コケムシ類バンクの間の凹みの最も深い所で35cmにも達するが、普通数cmの厚さである。Højjerup Church の魚粘土は、4つの薄い層に分けられている。中間の2層の混った資料を分析した。これらは、黒色ないし暗灰色で、下位のものは、黄鉄鉱結核を含み、下と上の層は淡灰色である。魚粘土の上は、Cerithium 石灰岩が、小さい凹みに約50cmの厚さであり、バンクの上で消える。硬く、黄色で、多くの溝で切られている。この上に、厚いコケムシ類石灰岩がある。

デンマークの堆積物は、浅海域のもので、石灰岩は、二枚貝・ウニ・コケムシ類やサンゴの広範な底生動物を保存している。有孔虫やココリスの帯は、Gubbio と Stevns Klint の K-T 境界が、同時代であることを示している。しかし、古磁気の結果は、Stevns Klint では利用出来ない。

K-T 境界付近からの7試料が分析された。Ir は境界粘土で 41.6 ± 1.8 ppb で、背景レベルでは ~ 0.26 ppb であり、160倍になる。K-T 境界の異常の Ir

濃集は、地球外物質の異常な到来を示すとして解釈される。境界層と標準層との Ir の同位元素の割合などの検討の結果、隕石衝突の考えが、生物学的・物理学的証拠を説明することを明かにした。小惑星が、地球に衝突し、凹地を作り、クレーターから、塵が成層圏に達し、地球の周りに拡がり、数年の間、太陽光が地表に達するのを効果的に防げた。塵が地球に到着くまで、太陽光の喪失は、光合成を抑制した。結果として、大抵の食物連鎖が崩壊した。そして、消滅が、結果として起こったと説明出来る (Alvarez et al, 1980⁽²⁾)。

Ganapathy (1980)⁽⁷⁾ は、魚粘土 (fish clay) の Ir と Co について、その分析結果を示し、また、その他の金属についても、その分析結果を示し、白亜紀末の地球上の生命の大きな消滅は、隕石の衝突に関係していると結論した。

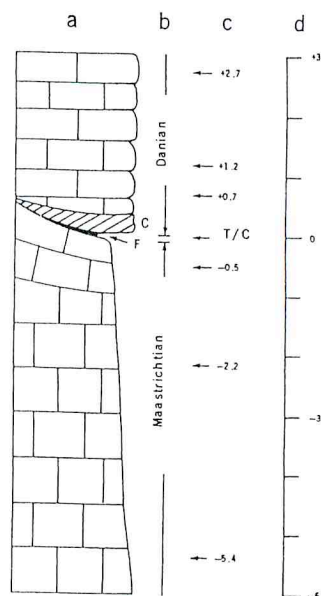


図2. デンマークの Stevns Klint の Højjerup Church の層序断面 [Alvarez et al. (1980) による]

a : 岩相 (C—Cerithium 石灰岩 ;
F—魚粘土 Fish clay)

b : 階

c : サンプル層準

d : メーター

3) スペイン南東部の Caravaca

Smit・Hertogen (1980)⁽⁸⁾ は、スペイン南東部の Caravaca の Barranco del Gredero で、上部白亜紀層、境界層、下部暁新世層の Ir その他の金属の分析結果を示し、Ir と Os は他のものと異なる起源であるとし、太陽系の平均と比較出来るものであるとした。境界で、Ir が26.6 ppb と24.3 ppb の数値を示した。

衝突隕石の大きさの見積

地球と衝突する小惑星の見積を、Alvarez et al. (1980)⁽²⁾ は示しているが、10km又はそれ以上の直径をもつ、地球を横切る小惑星に対する衝突の平均時間は、2億年で7回、すなわち、約3000万年である。また、こじつけた計算では、1億年の平均衝突時間が、10kmの直径で、矛盾がないと見積られている。彼等は4つの方法で、衝突した小惑星の大きさの見積をしているが、要するに、約10±4 kmの直径をもつ衝突する小惑星と矛盾ないことを結論としている。

K-T境界における世界の Ir 異常の場所

Alvarez et al. (1982)⁽⁹⁾ によれば、少なくとも、7つの研究所が、K-T境界と関係した堆積物の Ir 分析を行っている。Ir の異常に高い値を示す36ヶ所がある。

Orth et al. (1981)⁽¹⁰⁾ は、北東部 New Mexico の Raton 盆地で、初めて、淡水成堆積層にK-T境界と Ir 異常を発見した。Tschudy の石炭層の分析により、Raton 層の基底上約80mの2枚の石炭層の間の3m間隔の中に、K-T境界を花粉学的に確立し、同じ層準に Ir 異常を認めた。花粉学的な結果は、*Proteacidites*, “*Tilia*” *wodehouseii* Anderson, *Gunnera* と *Trichopeltinites* の急速な消滅と、それと対照的に、*Ulmipollenites* と10~15の他の種が消滅しなかった。境界より上は、シダ植物胞子が増加し、反対に、被子植物花粉が少くなる。Ir のピークは、石炭層の基底近くと下の泥岩との接触部に来る。異常帯の $^{241}\text{Pu}/\text{Ir}$ atom ratio は $\leq 1 \times 10^{-7}$ で、Ir 異常の源として超新星の事件を考慮しなくてよい。

衝突場所の候補地

直径10kmの隕石が、地球にぶつかったら、大きなク

レーターが出来る。松井 (1989)⁽¹¹⁾ は、シミュレーションによって、変化を数字で示した。海に、秒速20kmでぶつかると、衝突の瞬間から30秒後、すでに、隕石は30km以上もぐり込み、蒸発したものは、40km位上空の成層圏を越えた高さに達する。吹き上げられたものは、地球全体に、短時間で広がっていく。このとき、地表環境は、明らかに、ものすごく変化する。生態系にも、大きな影響が出てくる。陸に落ちた場合は、120日位経過すると、地表温度が-20℃になる。通常の温度に復するのに2年近くもかゝると云う。

Alvarez et al. (1982)⁽⁹⁾ は、衝突場所の候補地として、次のものを示している：1) Masaytis (1980)や Hsü et al. (1981) によって認められた旧ソ連の Kara (直径60km) と Kamensk (直径25km) の2つのクレーターを挙げたが、いずれも、150~200 kmのクレーターの見積よりはるかに小さい。2) ポルトガル沖の Tagus Abyssal Plain —— 直径300kmの丸い縁がある。それと連って、Tore 海山 (85kmの直径) と Horseshoe Abyssal Plain をとりまく2つの中間の大きさのゆがんだ輪の地形がある。しかし、海底岩石の検討、K-T境界 section にタービダイトが認められなかったことなどから、Tagus —— Tore complex は衝突場所ではない。3) Mid Atlantic Ridge, 4) British 第三紀火成岩地区の火山中心、5) ハワイの plume —— 明治天皇海山、6) インドのデカン高原の火山噴出が、K-T衝突で、引金を引かれて活動したなど、色々の意見が出された。

最近、米航空宇宙局エイムズ研究センターのデュラ博士ら (1991) が、人工衛星からの観測による「セノーテ」の分析から、ユカタン半島 (メキシコ) が、巨大隕石の衝突現場であると報告した。ユカタン半島北部に、セノーテが、円弧を描いて並んでいて、隕石衝突で、円弧形の断層が出来た。円弧の直径は約170kmであると云う。

北半球の白亜紀末期の花粉群集の特徴

北半球の白亜紀後期の花粉・孢子による植物群集の特徴については、これまで、多くの研究者によってなされた。これらの研究の成果として、その花粉群集の特徴と花粉植物群地理区について、近年、筆者 (1990)⁽¹²⁾ が総括した。

2つの花粉植物群地理区を認めた：1) *Aquila-pollenites* 花粉植物群地理区と2) *Normapollens* 花粉植物群地理区である。前者は、シベリア、極東、

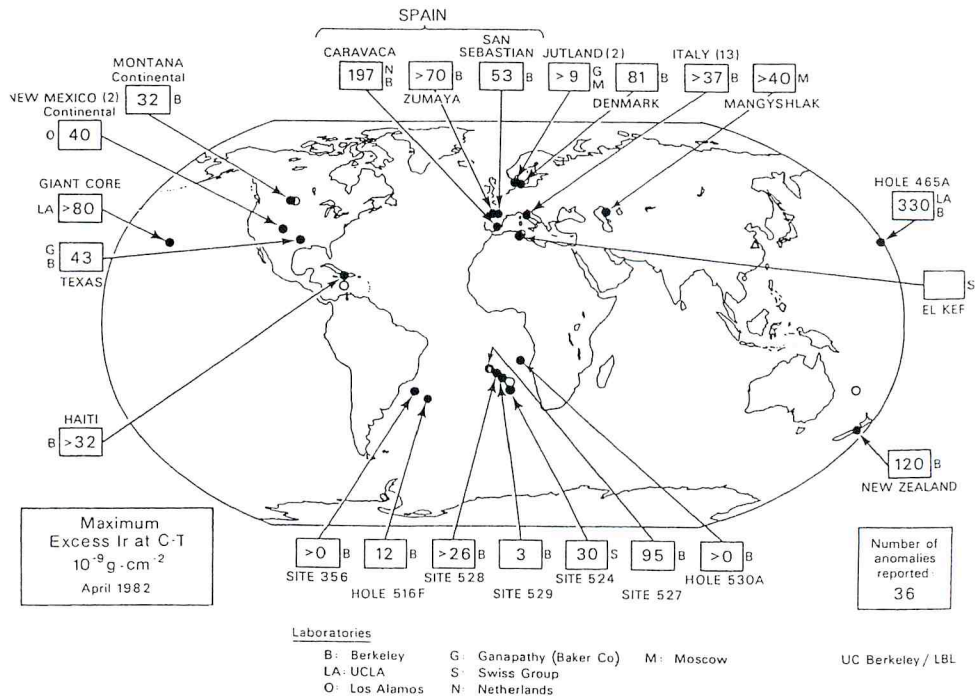


図3. K-T境界における Ir異常の世界の分布 [Alvarez et al. (1980) による]
 数値は $10^{-9} \text{g} / \text{cm}^2$ (ppb) の単位

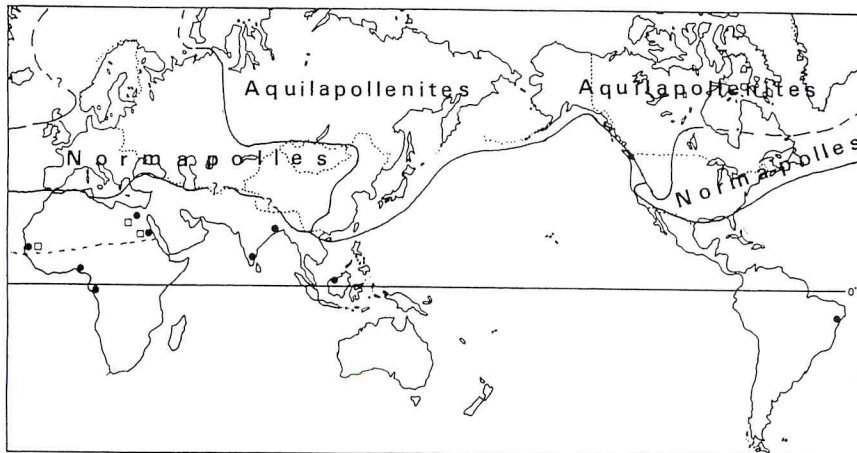


図4. 上部白亜紀末期および古第三紀初期における *Aquilapollenites* 花粉とNormapollis 花粉の地理学的分布 (高橋 1990)

- : province 外における *Aquilapollenites* 花粉の産地
- : province 外における Normapollis 花粉の産地

中国東-南部, 日本, アラスカ, 北米大陸西部, カナダ北極圏, ユーコン, グリンランド, スコットランド (マル島) などを含む。主要花粉 taxa は *Triprojectacites* 花粉 (*Aquilapollenites*, *Triprojectus*, *Hemicorpus*, *Mancicorpus*, *Pseudointegricorpus*, *Integricorpus*, *Bratzevaea*, *Pentapollenites*, *Kurtzipies* [*Fibulapollis*], *Orbiculapollis*, *Jiangsupollis* など), *oculata* 花粉 (*Wodehouseia*, *Azonia*, *Cingularia*), *Callistopollenites*, *Paraalnipollenites confusus*, *Proteacidites*, *Phyllocladidites* などである。Triprojectacites 花粉は, 現生の Santalaceae と Loranthaceae の花粉に形態的に関連があるといわれている。この花粉グループは, Santonian に出現し, Campanian にその属・種の多様化が進み, 分布域が拡大し, Maastrichtian にその繁栄の頂点に達した。暁新世に入り, 急激に減少した。Oculata 花粉は, Triprojectacites 花粉に伴って産する。

後者は, ヨーロッパ大陸, 北米大陸東・中・南部, 中国中・西部にわたる。Normapolles 花粉グループの taxa は, 現在, 100属以上の形態属に区別されているが, 現生植物との系統発生的関係は不明である。最初の出現は, ヨーロッパ大陸において, Cenomanian 中期であり, 分布範囲は, 速やかに拡大し, 始新世末で消滅した。

北米大陸西部のデータ

K-T境界問題が, パリノロジーや Ir 異常などの研究と関連して, 最もよく研究されているのは, 北米大陸西部の地域である。(Tschudy et al., 1984⁽¹³⁾; Nichols, 1990⁽¹⁴⁾)

1) Raton 盆地

Ir 異常で特徴付けられた, 最初の非海成層の K-T境界の場所は, New Mexico の Raton 盆地からのコアである (Orth et al., 1981⁽¹⁰⁾)。現在, 北東部 New Mexico と南東部 Colorado の盆地の15以上の露頭で知られている (Pillmore et al., 1984⁽¹⁵⁾; Fleming, 1988⁽¹⁶⁾)。

New Mexico (図5: 1; 図6: 1, 2)

York 峡谷: Raton の西50kmの York 峡谷のボーリング試料で, カオリナイトに富む, 境界の粘土の上の薄い石炭の基底が Ir 異常を示す。境界は, Vermejo 層の上端の上約80mであり, Trinidad 砂

岩の上端の上170mにある。Proteacidites 花粉は Ir 異常の層で消滅し, シダ植物胞子の被子植物花粉への割合は顕著に変わる。

Raton: Raton 市の西1kmの Climax 峡谷公園の旧 Raton 峠道路に沿った切割で, Ir 異常が Proteacidites 群集の消滅と一致する。境界は薄い石炭層の基底の下約5cmの所にある2cmのカオリナイト粘土の上端にある。

Sugarite: Sugarite 石炭は, Sugarite 旧市に近い谷底の上約150mの, 峡谷の東の壁の地すべりの跡に露出している。下位の帯は, 薄いので, Sugarite 石炭層は, Trinidad 砂岩の上端の上約30mにあり, Raton barren series の崖を作る砂岩の基底の下3mである。Sugarite では, 石炭層は, 1.8mの厚さで, 2つの薄い部分を含んでいる。炭質頁岩は, 石炭の基底上40cmで, カオリナイトに富む境界粘土は, 2~4cmの厚さで, 上端の下15cmにある。この粘土は, Ir が集中し, Proteacidites 群集の消滅がみられ, シダ植物胞子/被子植物花粉の割合が変わる。他の4地点で, 同じ様に, 境界の粘土を観察した。

Colorado ((図5: 2; 図6: 3~5))

Starkville と Clear Creek: K-T境界は, Starkville 出口の南3.2kmの Starkville North の I-25の東側の道路の切割の舗道レベルの上34mで, 50cmの厚さの炭質頁岩層の中にあった。花粉記録のvarietyで, 厚さ0.5cmの薄い黒色炭質頁岩中に, Ir の集中を測定した。頁岩は, 主にカオリナイトから成り, 花粉が少なく, シダ植物胞子/被子植物花粉の割合が21%から98%に変化する。

Starkville South では, 最も強い Ir 異常を測定した。花粉群集, シダ植物胞子/被子植物花粉の割合は, Starkville North と同じである。I-25からの Spring Creek の出口近くの Clear Creek North と Clear Creek South で境界を認めた。ここで Ir 異常が認められ, 花粉の変化とシダ植物胞子/被子植物花粉の割合の逆転を示す。

Madrid: Starkville の10km西の Madrid の近くの鉄道の切割に沿って, Ir 集中が, 1~3cmの厚さの, 白く風化した境界粘土層の上端にある薄い暗色頁岩の中で測定された。Proteacidites 群集が消滅し, シダ植物胞子/被子植物花粉の比率が, 他の地域と同じく, Madrid の境界粘土の上端で変わる。

他の地点: K-T境界におけるカオリナイト粘土は, Purgatoire 峡谷の2kmの露頭に沿って, Madrid の西1.2kmの地点に追跡された。境界粘土は Raton

盆地の広い地域に広がる単層である。

Gilmore et al. (1984)⁽¹⁷⁾ は New Mexico と Colorado の5地点で Ir 異常を報告した。

2) Lance Creek (図5:3; 図6:6)

Powder River 盆地の南東端の Wyoming の Lance Creek の附近は、アメリカ西部の最上部白亜紀と最下部第三紀の層序学的ならびに古生物学的研究の歴史において、古典的地域である。この地域は“Ceratops beds”で知られており、また幾つかの初期の大型植物化石研究でも知られている。パリノロジーでは、Leffingwell (1970)⁽¹⁸⁾の研究が知られている。彼の研究は、北米西部のK-T境界の層序学的位置を決定するのに、palynomorph の価値を示し、Lance 層の上部の数mの間隔に、K-T境界を定めた。Bohr et al. (1987)⁽¹⁹⁾によって、Lance Creek の町の北数kmの Dogie Creek で、Lance層の上端近くで、Ir 異常が見出された。恐竜の骨は境界の下1m弱のところに産する。

Nichols et al. (1992)⁽²⁰⁾によれば、Powder River 盆地西部のK-T境界は、パリノロジーで定められた消滅層準、シダ植物孢子の多産、Ir の強い異常、衝撃石英粒によって特徴付けられている。K-T境界は1~2cmの厚さの粘土岩層の中に来る。衝撃

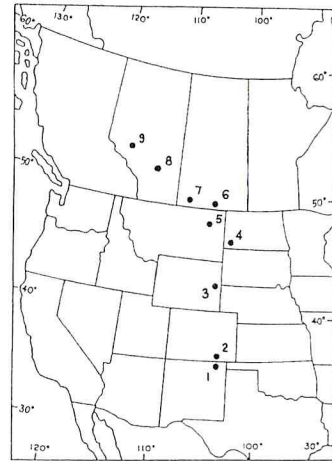


図5. 北米西部の非海成層のK-T境界でパリノロジーおよびIr異常のデーターのある地点 (Nichols 1990による)

1-Raton basin, New Mexico; 2-Raton basin, Colorado; 3-Lance Creek, Wyoming; 4-Pyramid Butte, North Dakota; 5-Hell Creek, Montana; 6-Morgan Creek, Saskatchewan; 7-Frenchman Valley, Saskatchewan; 8-Red Deer Valley, Alberta; 9-Coal Valley, Alberta.

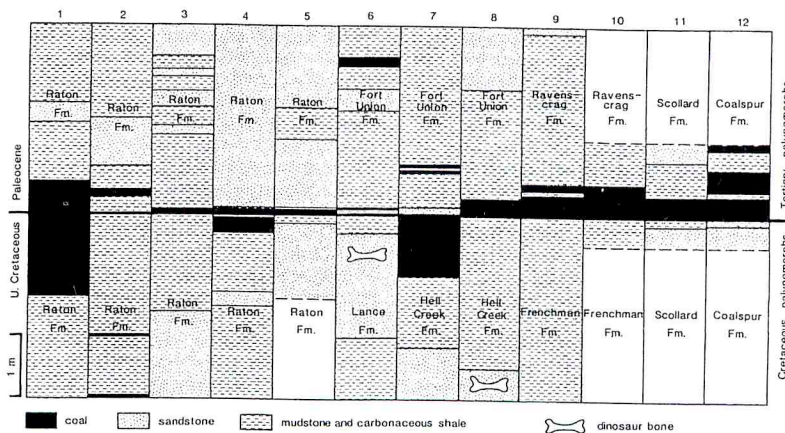


図6. 北米西部の非海成層のK-T境界の層序学的対比 (Nichols 1990による)

1-Sugarite, New Mexico; 2-Old Raton Pass, New Mexico; 3-Starkville South, Colorado; 4-Madrid, Colorado; 5-Berwind Canyon, Colorado; 6-Lance Creek, Wyoming; 7-Pyramid Butte, North Dakota; 8-Hell Creek, Montana; 9-Morgan Creek, Saskatchewan; 10-Frenchman Valley, Saskatchewan; 11-Red Deer Valley, Alberta; 12-Coal Valley, Alberta.

石英粒は、この層の最上部に集中し、シダ植物孢子と Ir 集中は、この層の中で高いが、境界粘土岩層をおおむ 2 cm の厚さの炭質粘土岩の中で最大の集中に達する。最も普通の被子植物花粉は、*Aquilapollenites conatus*, *A. delicatus* var. *collaris*, *Pandaniidites typicus*, *Proteacidites retusus*, *P. sp. 2*, *Tricolpites microreticulatus*, *Ulmipollenites* spp., *Wodehouseia spinata* で、Maastrichtian palynoflora の 42% が K-T 境界で消滅した。Taxa の消滅は、蘚苔類やシダ植物で少く、13% で、裸子植物は 25% で、被子植物は 50% で、最も多い。多様性は、白亜紀最末期から第三紀最初期に、約 $\frac{1}{3}$ 減少した。第三紀の palynomorph の多様性は、白亜紀から残ったものに加えて、境界の上のサンプルに最初に現われる taxa を含む。K-T 境界のパリノロジーのデータは、北米西部を通じての結果とよく一致する。Ir 異常は、最高で 26ng/g(ppb) を示し、これは K-T 境界になる。通常の場合よりも約 1000 倍大きい値である。140 の衝撃石英粒子が集められた。最大粒は 0.50 mm の直径で、平均は $0.22 \pm 0.07\text{mm}$ である。同様の衝撃鉍物粒子が、世界的に、K-T 境界に知られている。

3) Pyramid Butte (図 5 : 4 ; 図 6 : 7)

境界は North Dakota 南西端の Marmarth の町の近くに位置する。この地域では、夾炭 Fort Union 層が、恐竜を含む Hell Creek 層をおおっている。パリノロジーと Ir 異常によって決められた K-T 境界は Pyramid Butte の基底 Fort Union 石炭の上端面に位置する。K-T 境界は大型植物群と花粉群集の大きな変化・消滅によって特徴付けられる。恐竜の骨は、この地域のほかの地点で、この基底石炭の下 1 m までに産する (Johnson et al., 1989⁽²¹⁾)。

4) Hell Creek (図 5 : 5 ; 図 6 : 8)

非海成層の K-T 境界に関係した、最も徹底した研究がなされた地域は、Montana 東部の Hell Creek 地域である。Hell Creek 層の標準地域で、恐竜の骨を産出するので、良く知られている。パリノロジーの研究は 1960 年代の末頃から始まっている。(Norton・Hall, 1969⁽²²⁾; Tschudy, 1970⁽²³⁾)。

最近、Hotton (1984⁽²⁴⁾, 1988⁽²⁵⁾) によるパリノロジーの研究がある。彼によると、東中央部 Montana の K-T 境界で、多くの花粉 taxa が急に消滅し、孢子/花粉の比率が増加し、Ir の集中がみられる。Ir 異常は、通常、最下位の褐炭の 1 枚の基底に

あるピンク粘土層にみられる。植物群の約 25% が消えた。花粉では、*Aquilapollenites* spp., *Cranwellia striata*, *Proteacidites* spp., *Leptopocites*, *Marsypiletes*, *Liliacidites* spp., *Tricolpites microreticulatus*, その他などであり、これらは、通常、植物群の 5%, 又はそれ以下からなる。花粉の変化は層の境界の岩相の変化と一致しない。Ir を含む境界石炭の上下は Ir 異常を含まない。花粉交代は最後の恐竜の産出の上 2~3 m である。

Ir 異常は、Hell Creek 地域で、パリノロジーで定められた K-T 境界に見出される (Smit・van der Kaars, 1984⁽²⁶⁾)。

いくつかの場所では、境界は、Fort Union 層の最下位の持続的な石炭層、Z 石炭、の基底にあるが、他では、Hell Creek 層の中で、この層準の下 11m 程の所である。地域の 1 つの場所で、最初に、衝撃鉍物が粘土岩層に見出された (Bohr et al., 1984⁽²⁷⁾)。R.H. Tschudy (in Bohr et al., 1984) は、最上部白亜紀からの palynomorph は、*Pandaniidites*, *Alnipollenites*, *Proteacidites*, *Kurtzipites*, *Wodehouseia spinata*, *Aquilapollenites* spp. (多数), *Ulmipollnites*, *Cranwellia*, *Liliacidites*, *Balmeisporites* を、暁新世群集として、*Ulmipollenites*, *Kurtzipites*, *Pandaniidites*, *Alnipollenites*, *Ovoidites* を示した。白亜紀のマーカー花粉、*Proteacidites* と *Aquilapollenites* の消滅とシダ植物孢子/被子植物花粉の比率の急な増加が、K-T 境界にみられる。

Hell Creek 地域では、恐竜の骨は K-T 境界の下 1.8m に産する (Nichols, 1990⁽¹⁴⁾)。

Montana 東-中央部の Hell Creek 層の標準地域では、少なくとも 3 つの *Triceratops* の骨格が、Hell Creek 層の上端の下 9-17m の間隔から発見された (Russell・Singh, 1978⁽²⁸⁾)。同じ地域から、palynoflora の変化と K-T 境界の Z 石炭の基底の 4 m 内に再堆積していない恐竜の骨が発見された (J.L.・H.B. in Lerbekmo et al., 1979⁽³²⁾)。

Bohr et al. (1987)⁽²⁹⁾ によれば、Montana の東-中央部の Hell Creek 地域の Brownie Butte 近くの K-T 境界の粘土岩に、衝撃石英が発見された。彼等は、イタリアの Pontedazzo と Petriccio, デンマークの Stevns Klint, スペインの Caravaca, 北-中部太平洋の GPC-3, ニュージーランドの Woodside Creek からも衝撃石英粒を報告している。

5) Morgan Creek (図5:6; 図6:9)

南-中央部 Saskatchewan の Morgan Creek の K-T 境界は, Ravenscrag 層の基底第三紀石炭層 (Ferris 石炭) の直下, すなわち, Frenchman 層の上端に来る. Nichols et al. (1986)⁽³⁰⁾ によれば, Maastrichtian で消滅する花粉群集は, *Aquilapollenites quadrilobus*, *A. attenuatus*, *A. delicatus collaris*, *A. conatus*, *A. spp.*, *Proteacidites* spp., *Gunnera microreticulata*, *Cranwellia rumseyensis*, *Leptopocypites pocockii*, *Marsypiletes cretacea*, *Liliacidites complexus*, *Ephedra cretacea* などである. 境界粘土岩の下0.1~12 mの間隔では, 被子植物花粉は42~92%, シダ植物胞子は5~46%で, 裸子植物花粉は, 特に taxodiaceous 又は cupressaceous 種であるが, 3~12% 産する. Palynomorph の大きな転換は境界で起こり, 境界粘土の直上のサンプルは圧倒的にシダ植物胞子が優勢である. これは New Mexico や Montana と同じである. *Laevigatosporites haardtii* が優勢である. Palynoflora の30%が K-T 境界を越えない. 上部白亜紀に普通の *Wodehouseia spinata* が最下部第三紀の上に生き残るが, 南西部 Saskatchewan と Alberta の K-T 境界の上に一貫して産する *Aquilapollenites reticulatus* はここでは白亜紀に限られている. 第三紀に入ると, *Triporopollenites* が最下部第三紀で新しく加わる. *Momipites* が境界上5.5mに産する. 沼沢植物を示す石炭サンプルは風媒花双子葉被子植物 (*Triporopollenites* や *Ulmipollenites* 花粉) や単子葉 (*Arecipites* 花粉) に富んでいる. Taxodiaceous 又は cupressaceous の裸子植物花粉は出現に上下があるが, 或サンプルでは優勢である. 胞子は *Sphagnum* が目立つ. 恐竜の骨は Frenchman 層の斜面にある K-T 境界下約10mである. Ir の最大の集中 (3000ppt) は, No.1 石炭の直下の褐~黒色炭質粘土岩の2cmの厚さの層にあり, この層の下に, Ir 840pptのピンク色がかかった黄褐色の粘土岩の1.5cmの厚さの層がある. Ir 異常は普通の約100倍の大きさである. K-T 境界は花粉群集の消滅, Ir 異常, 衝撃石英の発見によって特徴付けられる.

6) Frenchman 溪谷 (図5:7; 図6:10)

南西部 Saskatchewan の Frenchman 溪谷では, K-T 境界は, Morgan Creek におけるように, 事実上 Frenchman 層と Ravenscrag 層の境界と一

致する (Lerbekmo et al., 1987)⁽³¹⁾. Saskatchewan の2つの場所の palynomorph の間には, 細部には差異があるが, Frenchman 溪谷での境界直下の花粉群集は, さらに数mのものと比し, あまり著しく多様でない. そして第三紀基底の群集では, シダ植物胞子による優勢はない. 恐竜の骨は Frenchman 溪谷で, K-T 境界の下1.5mの Frenchman 層の中に産する.

7) Red Deer 溪谷 (図5:8; 図6:11)

Alberta 州の南-中央部の Red Deer 溪谷では, palynomorph の交代は Scollard 層の中の Nevis 石炭層の上端に近い20cmのベントナイトの上1.5mに中心をおく2m間隔の中にある. Palynoflora の変化は, *Aquilapollenites spinulosus* を除き, 少くとも10種の *Aquilapollenites* が消滅し, *Wode-*

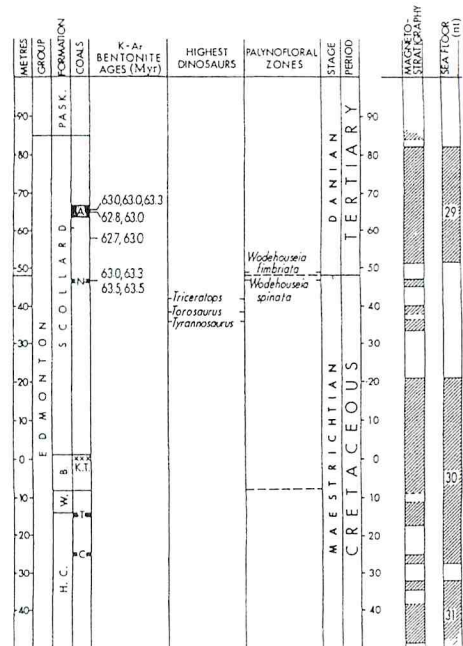


図7. アルバータ州, Red Deer 溪谷の Edmonton 層群上部の生層序, 磁気層序と地質年代 (Lerbekmo et al., 1979 による)

B., Battle; W., Whitemud; H. C., Horseshoe Canyon; A., Ardley; N., Nevis; K.T., Kneehills Tuff; T., Thompson; C., Carbon. Cross-hatching denotes normal polarity intervals.

houseia spinata, *Cranwellia striata*, *Proteacidites* sp. その他が消滅した。 *Wodehouseia fimbriata*, *Alnus trina*, *Carpinus subtriangula* が交代して出現した。恐竜 *Triceratops* の最上部産出層準は Nevis 石炭の下 $\sim$ 4.5mで、K-T境界の palynomorph 交代の下6mである。4枚のベントナイト層のK-Arで年代が測定され、K-T境界から1m下の試料で63.0 $\sim$ 63.5Myrを、11m上位で62.7 $\sim$ 63.0Myrを、17 $\sim$ 17.5m上位で62.8 $\sim$ 63.3Myrを示している。Palynoflora 交代の年代は63 $\pm$ 2 Myrで示された。古地磁気のデーターでは、SFデーターに対比すると、境界は正磁極帯29の開始前の逆磁極帯にあり、Scollard 層における正磁極帯29と30の間の逆磁極帯の厚さは30mであり、47万年の時間の長さを示す。恐竜の最後の遺体の埋没は正磁極帯29の始まる前約12万年であり、この地域での恐竜と花粉群集の消滅の間の時間の食違いは約9万年である。(Lerbekmo et al., 1979⁽³²⁾)。

K-T境界年代に関しては、松本(1970)⁽³³⁾は63 $\sim$ 64Myrというよりも、63(- α) Myrとした方がよいと述べている。

最近、Sweet と Hills (1984)⁽³⁴⁾はK-T境界の正確な位置を決定した。この境界を Scollard 層の Nevis 石炭層準の基底に置いた。 *Aquilapollenites* とそれに伴う被子植物の多様と多産の上方への減少による植物群の交代はK-T境界を特徴付ける。被子植物の増加に続いた *Laevigatosporites* の優勢の急な変化は暁新世基底層に起こる。Maastrichtian 群集は *Aquilapollenites attenuatus*, *A. conatus*, *A. delicatus* var. *collaris*, *A. pulcher*, *A. quadricretaceus*, *A. reductus*, *A. reticulatus*, *Gabonispors* sp., *Gunnera microreticulata*, *Leptopocipites pocockii*, *Marsypiletes cretacea*, *Wodehouseia spinata* で、*A. reticulatus* と *Wodehouseia spinata* は Nevis 石炭層準を通してつながる。Nevis 石炭の中および直上にくる代表的な暁新世 taxa は、 *Brevicolporites colpella*, *Caprifoliipites* sp. cf. *C. longus*, *Momipites tenuipolus*, *Syncolporites minimus*, *Wodehouseia fimbriata* である。Ir 異常および衝撃鉱物粒も境界粘土岩および Red Deer 溪谷でのベントナイト粘土にみられる。境界上下の palynoflora 群集は Saskatchewan の Frenchman 溪谷や Alberta の石炭溪谷のものに密接に似ている。

8) 石炭溪谷 (図5:9; 図6:12)

中央部 Alberta の丘陵地帯の石炭溪谷で、K-T境界は Coalspur 層の層序学的に最下位の厚い石炭層である Mynheer 石炭層の基底にみられる (Jerzykiewicz・Sweet, 1986⁽³⁵⁾; Lerbekmo et al., 1987⁽³¹⁾)。北米の他の地点で見られる様なK-T境界の粘土岩層はここでは発見されなかった。Ir 異常は Mynheer 石炭層の基底部にあり、炭層はベントナイトのレンズを含む。これは下の泥岩の中のパリノロジー消滅の丁度上である。コアから試料を得たので、石炭の直下のものが、数cm欠けていたこともありうる。

K-T境界を過ぎる palynomorphs の消滅と生き残りの総括

上に述べた北米西部の各地におけるK-T境界の上下のパリノロジー群集について、その変遷を総括的に示すと、次の様にまとめられる。

北部地域では、key pollen taxa である *Aquila-pollenites* spp. と *Proteacidites* spp. の消滅がK-T境界を決めるのに役立っている。Leffingwell (1970)⁽¹⁸⁾によれば、Lance Creek 地域のK-T境界のパリノロジーの変化は北部地域全体を表わすのに通用する。次の taxa が白亜紀 Lance 層に限られて産出する: *Proteacidites* spp., *Aquilapollenites spinulosus* を除く *Aquilapollenites* のすべての種, *Gunnera microreticulata*, *Liliacidites altimurus*, *L. complexus*, *Cranwellia striata* である。また、*Wodehouseia spinata*, *Tricolpites parvistriatus* と *Arecipites columellus* は Lance 層に普通であるが、Fort union 層にも稀に産出する。暁新世に普通にある白亜紀の群集の特徴的要素は *Kurtzipites trispissatus*, *Triporopollenites plektosus*, *Ulmipollenites* ssp., *Alnipollenites* spp. である。

南部地域では、K-T境界で消える *Proteacidites* spp. は南北両方にあるが、その他のものは "*Tilia*" *wodehousei*, *Trisectoris*, *Trichopeltinites* sp. (葉につく寄生植物又は着生植物として成長した fungal thallus である?) である。最上部白亜紀および下部第三紀に普通にみられる taxa は *Gunnera microreticulata*, *Fraxinoipollenites variabilis*, *Liliacidites complexus*, *Thomsonipollis magnificus*, *Tricolpites anguloluminosus*, *Panda-niidites radius*, *Arecipites columellus*, *Salixi-*

pollenites sp. である。

K-T境界粘土とその上に“barren-and-recovery” interval と呼ぶ1つの zone がある。Palynomorphs が欠如又は稀である数百万年の岩石よりなる。この interval は植物の腐食や火事を示す豊富な sapropel や fusinite を産する。生き返った第三紀植物群の最初の証拠である多くのシダ植物胞子と少ない花粉を産する数cmの泥岩又は石炭が上にくる。シダ植物胞子は、一般に、最上部白亜紀に現われた range 長い種である。Barren interval では、境界粘土の上10~15cm、被子植物花粉が再び優勢になるまで、段々と被子植物花粉が多くなり、シダ植物胞子が少くなる岩石に続く。これらの観察は、植生が、植物生態系を荒廃させ、或属種を消滅させた意味深い衝撃を受けたことを暗示する (Tschudy・Tschudy, 1986⁽³⁶⁾)。

Nichols et al., (1986)⁽³⁰⁾ は、Saskatchewan の境界で、約30%の被子植物花粉が消滅し、Hotton (1984)⁽²⁴⁾ は、Montana の Hell Creek 地域の境界で、25%の花粉が消滅したことを示した。Leffingwell (1970)⁽¹⁸⁾ は、僅か6被子植物花粉 taxa が Lance 層に限られたが、20以上の白亜紀被子植物花粉 taxa が第三紀に持続したことを報告した。Raton 盆地では、被子植物花粉の3属が白亜紀に限られている。

北海道におけるK-T境界と花粉群集

北海道東部の根室層群におけるK-T境界問題に関し、アンモナイトは床潭層下部まで産し、有孔虫およびナンノ化石からは、床潭層が Danian であるとしている (吉田・君波, 1980⁽³⁷⁾; 吉田, 1981⁽³⁸⁾)。ナンノ化石によると、K-T境界は厚岸層の下部又は中部に置かれなければならないとした (Okada et al., 1987⁽³⁹⁾)。花粉群集の見地から、筆者は、厚岸層および床潭層は Maastrichtian の特徴を有しており、境界は床潭層と霧多布層との間に来るのではないかと云う意見を述べた (高橋・植田, 1990⁽⁴⁰⁾; Takahashi, 1991⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾; 高橋, 1991⁽⁴³⁾)。この地域では、Ir 異常を含む層が未発見である。また、この地域は地層堆積時の海底地上りなど、地層に乱があり、そのためか、化石相互に混乱がみられる。

最も注目されるのは、十勝地方の川流布地区であり、Saito et al. (1986)⁽⁴⁴⁾ により、浮遊性有孔虫によって、活平層上部にK-T境界が定められた。彼等によ

ると、Maastrichtian では、*Globigerinelloides multispina* (Lalicker), *Rugoglobigerina hexacamerata* Bronnimann, *R. rugosa* (Plummer), *R. milamensis* Smith & Pessagno, *R. macrocephala* Bronnimann, *R. scotti* (Bronnimann), *Globotruncanella kefennsoura* Solakius, *G. petaloides* (Gandolfi), *Globigerinelloides volutus* (White) が産出し、Danian では、*Eoglobigerina* sp., *Globigerina fringa subbotina*, *G. eugubina* Luterbacher & Premoli Silva, *Globorotalia pseudobulloides* (Plummer) が示されている。K-T境界を示す6~10cmの厚さの灰黒色粘土岩が最上部白亜系と最下部第三系を区分し、フランボイダル黄鉄鉱に富み、鉄が上下の層より5倍以上も集中していると言う。花粉・胞子群集については、最上部白亜紀はシダ植物胞子-被子植物花粉に富み、境界の粘土岩には、シダ植物胞子が優勢であり、第三紀に入ると、松科花粉が優勢であると言う。最も明瞭な植物群の変化は境界を示す粘土岩の基底に起っていると云う。そこでは、被子植物-裸子植物花粉が著しく減退し、シダ植物胞子が劇的に増加していて、この花粉学的変化のパターンは北米大陸西部と同じであるという (斉藤, 1986⁽⁴⁵⁾; 斉藤・海保, 1986⁽⁴⁶⁾)。

高橋は山野井が作製した薄片を観察し、特に被子植物花粉を中心に、層序学的に重要と思われるものについて検討した (高橋・山野井, 1992⁽⁴⁷⁾)。結果は図8に示す通りである。境界粘土岩層を横切って上下に顕著な被子植物花粉の交代は認め難い。北米西部では、大部分の *Aquilapollenites* と *Proteacidites* の消滅が大きな特徴であるに比し、川流布では、*Aquilapollenites conatus* は試料318-329にわたり見出されている。*Proteacidites* も境界の上下に産出し、*Cranwellia striata* は連続して産出する。これは全く北米西部と違った様相を示す。浮遊性有孔虫化石は層序学的に整然としているから、palynomorph も再堆積は考え難い。そうだとすれば、palynomorphs によるK-T境界決定は勿論、層序学的に全く使いものにならないと云うことになる。しかし、日本では Ir 異常粘土層が発見されていないし、衝撃鉱物も発見されていない。今後、これらの発見に努める必要がある。筆者は、化石、Ir 異常、衝撃鉱物などの要素が、北米大陸西部におけるように、日本でも境界を決定するのに十分理解出来るような説明をもたらすことを期待したい。

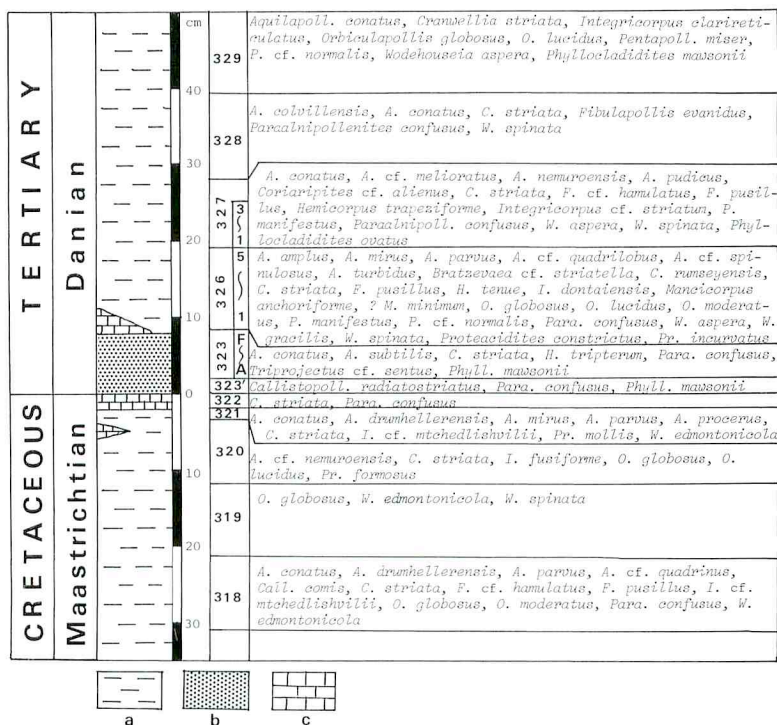


図8. 川流布における K/T 境界付近の岩相、試料番号および主要花粉 (高橋・山野井, 1992 による)

a : シルト岩, b : 粘土岩 (黄鉄鉱に富む) c : 石灰岩

大型化石の消長についての見解

古生物学的データーは、色々の無脊椎動物グループでは、過去100万～1000年以上にわたり、多様性において徐々に減退をしていることを示している。再検討すると、減退に加えて、4つのグループ (アンモナイト、唇口コケムシ類、腕足類、二枚貝) は K-T 境界の Ir 異常で突然影響されている。ゆっくりした減退は衝突に関係ないが、急な消滅は衝突と同時期である。アンモナイトについては2つのグループに分けられる: 1) 長く生きた taxa と 2) 生層序学的に有用な、短く生きた taxa. デンマークの Maastrichtian のアンモナイトでは、6科7属9種が白亜紀末のプランクトンの消滅と一致する Ir に富んだ fish clay の直下に産することが認められた。スペイン北部の Zumaya では、境界下12mまでアンモナイトが産する。Zumaya で長く生きた taxa のアンモナイトが早く消えたか理解するのは容易ではないが、Stevens Klint のパターンは、白亜紀末の衝突がアン

モナイトの最後の消滅を引き起こしたと云う考えを強く支持する。短く続いた taxa の前の減退が確かにアンモナイトをグループとして弱めたが、長く続いた taxa は衝突が起るまで、何の困難性がなかったのは明らかであるし、消滅は予言出来ない事変であったし、この事変なしには、アンモナイトは消滅しなかった (Alvarez et al., 1984⁽⁴⁸⁾)。

恐竜の産出については北米大陸西部地域ごとに記したが、Sloan et al. (1986)⁽⁴⁹⁾ は Montana で、恐竜の7種の歯が Ir 異常層の堆積後、channel 堆積物から発見されたことから、これらが再堆積でなく、恐竜は白亜紀末後も生きていたと述べた。恐竜消滅の理由として、白亜紀末の地球の温度の低下、Maastrichtian 末期中海水準の低下、結果としての季節性の増大、結果としての植物群の著しい悪化、アジアから米大陸に入った新しい哺乳草食動物からの広がった競争と云った諸要素が同時に起ったことを挙げた。Smit・Van der Kaars (1984)⁽²⁶⁾ は、これより先、Montana で、脊椎動物群が2つの異なる堆積相で産

し、2つの異なる動物群集よりなることを述べた。Hell Creek faunal facies と Bug Creek faunal facies で、後者は再堆積で、暁新世であることが判明した。白亜紀 Hell Creek 恐竜と哺乳動物は消え、花粉の交代を伴う Ir 異常層でおおわれる。或時間後、新しい哺乳動物グループの爆発的な拡大が続いた。

小島 (1991)⁽⁵⁰⁾ は恐竜の絶滅について、次の様に述べている。恐竜だけでなく、他の動物をも巻き込んだ絶滅の共通原因は、言うまでもなく、大規模な環境の変化にあると考える。恐竜の絶滅の原因の一つとして、白亜紀末期の大海退を考える。この海退によって、北米大陸とアジア大陸がつながったと考えられ、動物同士の接触が起こる。このような異種動物の接触が起ると、必ず大規模な絶滅が起っている。恐竜の場合も、同じ様な極めて大規模なケースであったと考える。こうした大海退に、地球規模での気温の低下によって氷床が発達する。大量の水が氷の形で陸上に蓄えられることによっておこるわけである。白亜紀末期にも氷床が著しく発達したのではないかと推定される。これらの原因により、恐竜は徐々に減っていき、絶滅に至ったと考える。

大型植物群の研究は、高度の分類上の解決に必要な群集をもつ地域の植物群を代表することにより、パリノロジーを補足するが、白亜紀末の植物群の歴史を解決するのに必要な試料と層序学的間隔を以前には欠いていた。

North Dakota の100mの厚さよりなるK-T境界 section から大型植物群のデータを詳細なパリノロジー分析と組み合わせた。境界は30%の palyno flora の消滅によって特徴付けられる。大型植物は境界をよぎって、79%の消滅を受けている。それより17mと25m下に小さい変化がある。このパターンは大流星衝突に先立って、白亜紀末期の気候が暖かくなることと一致する (Johnson et al., 1989⁽²¹⁾)。白亜紀末の気候の暖かくなることは、Hell Creek 層の中部から上部への移り変りで、全緑葉をもつ双子葉被子植物の% (35%から49%) が増すことを示すこれら大型植物群の形態分析に支持されていると云う (Wolfe・Upchurch Jr., 1986⁽⁵¹⁾)。

引用文献

- (1) Alvarez, L. W., W. Alvarez, F. Asaro and H. V. Michel : Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction : Experiment and theory. *Lawrence Berkley Report* LBL-9666, 86 (1979).
- (2) Alvarez, L. W., W. Alvarez, F. Asaro and H. V. Michel : Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction, experimental result and theoretical interpretation. *Science* 208, 1095-1108 (1980).
- (3) Gartner, S. and J. P. McGuirk : Terminal Cretaceous extinction scenario for a catastrophe. *Science* 206, 1272-1276 (1979).
- (4) Wolbach, W. S., R. S. Lewis and E. Anders : Cretaceous extinction : Evidence for wildfires and search for meteoritic material. *Science* 230, 167-170 (1985).
- (5) Officer, C. B., A. Hallam, C. L. Drake and J. D. Devine : Late Cretaceous and paroxysmal Cretaceous/Tertiary extinctions. *Nature* 325, 143-149 (1987).
- (6) Kremp, G. O. W. : Earth expansion, rather than an asteroid, caused the mass extinctions of the Cretaceous/Tertiary transition time. 1-58 (personal manuscript).
- (7) Ganapathy, R. : A major meteorite impact on the earth 65 million years ago : Evidence from the Cretaceous-Tertiary boundary clay. *Science* 209, 921-923 (1980).
- (8) Smit, J. and J. Hertogen : An extraterrestrial event at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Nature* 285, 198-200 (1980).
- (9) Alvarez, W., L. W. Alvarez, F. Asaro and H. V. Michel : Current status of the impact theory for the terminal Cretaceous extinction. *Geol. Soc. Am., Spec. Paper* 190, 305-315 (1982).
- (10) Orth, C. J., J. S. Gilmore, J. D. Knight, C. L. Pillmore, R. H. Tschudy and J. E. Fassett : An iridium abundance anomaly at the palynological Cretaceous-Tertiary boundary in northern New Mexico. *Science* 214, 1341-1343 (1981).
- (11) 松井考典 : 地球進化論. 1-147, 岩波書店(1989).
- (12) 高橋清 : *Aquilapollenites* 花粉グループと *Normapolles* 花粉グループ — その分布と層位学的意義 —. 長崎大学教養部紀要, 自然科学

- 30, 95-132 (1990).
- (13) Tschudy, R. H., C. L. Pillmore, C. J. Orth, J. S. Gilmore and J. D. Knight : Disruption of the terrestrial plant ecosystem at the Cretaceous-Tertiary boundary, Western Interior. *Science* 225, 1030-1032 (1984).
 - (14) Nichols, D. J. : Geologic and biostratigraphic framework of the nonmarine Cretaceous-Tertiary boundary interval in western North America. *Rev. Palaeont. Palynol.* 65, 75-84 (1990).
 - (15) Pillmore, C. L., R. H. Tschudy, C. L. Orth, J. S. Gilmore and J. D. Knight : Geologic framework of nonmarine Cretaceous-Tertiary boundary sites, Raton Basin, New Mexico and Colorado. *Science* 223, 1180-1183 (1984).
 - (16) Fleming, R. F. : Palynology of the Cretaceous-Tertiary boundary in the Raton basin : implications for development of the Tertiary flora (abstract). *7th Intern. Palynol. Congr., Brisbane*, 50 (1988).
 - (17) Gilmore, J. S., J. D. Knight, C. J. Orth, C. L. Pillmore and R. H. Tschudy : Trace element patterns at a non-marine Cretaceous-Tertiary boundary. *Nature* 307, 224-228 (1984).
 - (18) Leffingwell, H. A. : Palynology of the Lance (Late Cretaceous) and Fort Union (Paleocene) Formations of the type Lance area, Wyoming. *Geol. Soc. Am., Spec. paper* 127, 1-64 (1970).
 - (19) Bohr, B. F., D. M. Triplehorn, D. J. Nichols and H. T. Millard Jr. : Dinosaurs, spherules, and the "magic" layer : new K-T boundary clay site in Wyoming. *Geology* 15, 896-899 (1987).
 - (20) Nichols, D. J., J. L. Brown, M. Attrep Jr. and C. J. Orth : A new Cretaceous-Tertiary boundary locality in the western Powder River basin, Wyoming : biological and geological implications. *Cretaceous Research* 13, 3-30 (1992).
 - (21) Johnson, K. R., D. J. Nichols, M. Attrep Jr. and C. J. Orth : High-resolution leaf-fossil record spanning the Cretaceous-Tertiary boundary. *Nature* 340, 708-711 (1989).
 - (22) Norton, N. J. and J. W. Hall : Palynology of the Upper Cretaceous and lower Tertiary in the type locality of the Hell Creek Formation, Montana, U.S.A. *Palaeontographica, Abt. B*, 125, 1-64, (1969).
 - (23) Tschudy, R. H. : Palynology of the Cretaceous-Tertiary boundary in the northern Rocky Mountain and Mississippi embayment regions. *Geol. Soc. Am., Spec., Paper* 127, 65-111 (1970).
 - (24) Hotton, C. : Palynofloral changes across the Cretaceous-Tertiary boundary in east central Montana, U.S.A. (abstract). *6th Intern. Palynol. Conf., Calgary*, 66 (1984).
 - (25) Hotton, C. : Cretaceous-Tertiary palynostratigraphy in east central Montana, U.S.A. (abstract). *7th Intern. Palynol. Congr., Brisbane*, 76 (1988).
 - (26) Smit, J. and S. van der Kaars : Terminal Cretaceous extinctions in the Hell Creek area, Montana : compatible with catastrophic extinction. *Science* 223, 1177-1179 (1984).
 - (27) Bohr, B. F., E. E. Foord, P. J. Modreski and D. M. Triplehorn : Mineralogic evidence for an impact event at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Science* 224, 867-869 (1984).
 - (28) Russell, D. A. and C. Singh : The Cretaceous-Tertiary boundary in south-central Alberta — a reappraisal based on dinosaurian and microfloral extinction. *Can. J. Earth Sci.* 15, 284-294 (1978).
 - (29) Bohr, B. F., P. J. Modreski and E. E. Foord : Shocked quartz in the Cretaceous-Tertiary boundary clays : Evidence for a global distribution. *Science* 236, 705-709 (1987).
 - (30) Nichols, D. J., D. M. Jarzen, C. J. Orth and P. Q. Oliver : Palynological and iridium anomalies at Cretaceous-Tertiary

- boundary, south-central Saskatchewan. *Science* 231, 714-717 (1986).
- (31) Lerbekmo, J. F., A. R. Sweet and R. M. St. Louis : The relationship between the iridium anomaly and palynological floral events at three Cretaceous-Tertiary localities in western Canada. *Geol. Soc. Am. Bull.* 99, 325-330 (1987).
- (32) Lerbekmo, J. F., M. E. Evans and H. Baadsgaard : Magnetostratigraphy, biostratigraphy and geochronology of Cretaceous-Tertiary boundary, Red Deer valley. *Nature* 279, 26-30 (1979).
- (33) 松本達郎 : 中生界の地質年代. 科学 40, 248-255 (1970).
- (34) Sweet, A. R. and L. V. Hills : A palynological and sedimentological analysis of the Cretaceous-Tertiary boundary, Red Deer River valley, Alberta, Canada. 6th Intern. Palynol. Conf, Calgary, 160 (1984).
- (35) Jerzykiewicz, T. and A. R. Sweet : The Cretaceous-Tertiary boundary in the central Alberta foothills : stratigraphy. *Can. J. Earth Sci.* 23, 1326-1374 (1986).
- (36) Tschudy, R. H. and B. D. Tschudy : Extinction and survival of plant life following the Cretaceous/Tertiary boundary event, Western Interior, North America. *Geology* 14, 667-670 (1986).
- (37) 吉田三郎・君波和雄 : B根室地域. Cretaceous, 白亜系の国際対比に関する総合研究連絡紙 3, 3-4 (1980).
- (38) 吉田三郎 : 北海道根室市落石付近の根室層群産有孔虫について. Cretaceous, 白亜系の国際対比に関する総合研究連絡紙 4, 74-77 (1981).
- (39) Okada, H., M. Yamada, H. Matsuoka, T. Murota and T. Isobe : Calcareous nannofossils and biostratigraphy of the Upper Cretaceous and Lower Paleocene Nemuro Group, eastern Hokkaido, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan* 93, 329-348 (1987).
- (40) 高橋清・植田芳郎 : 根室層群厚岸層および床潭層の花粉層位学的考察, 長崎大学教養部紀要, 自然科学 31, 13-37 (1990).
- (41) Takahashi, K. : Palynologic study of the Akkeshi and Tokotan Formations of the Nemuro Group, eastern Hokkaido. *Bull. Fac. Liberal Arts, Nagasaki Univ., Nat. Sci.* 31, 169-513 (1991).
- (42) Takahashi, K. : Palynomorph assemblage of the Tokotan Formation at Konbumori Nemuro city. eastern Hokkaido. *Jpn. Jour. Palynol.* 37, 41-57 (1971).
- (43) 高橋清 : 霧多布およびユリ島の霧多布層の花粉層位学的研究. 日本花粉学会々誌 37, 23-34 (1991).
- (44) Saito, T., T. Yamanoi and K. Kaiho : End-Cretaceous devastation of terrestrial flora in the boreal Far East. *Nature* 323, 253-255 (1986).
- (45) 齊藤常正 : 白亜・古第三系連続層序. 地球 8, 675-679 (1986).
- (46) 齊藤常正・海保邦夫 : 白亜紀—第三紀 (C-T) 境界と恐竜の絶滅. 地球, 8, 192-202 (1986).
- (47) 高橋清・山野井徹 : 北海道東部川流布K/T境界試料の花粉学的検討. 長崎大学教養部紀要, 自然科学 32, 187-220 (1992).
- (48) Alvarez, W., E. G. Kauffman, F. Surlyk, L. W. Alvarez, F. Asaro and H. V. Michel : Impact theory of mass extinctions and the invertebrate fossil record. *Science* 223, 1135-1141 (1984).
- (49) Sloan, R. E., J. K. Rigby Jr., L. M. van Valen and D. Gabriel : Gradual dinosaur extinction and simultaneous ungulate radiation in the Hell Creek Formation. *Science* 232, 629-633 (1986).
- (50) 小島郁生 : 恐竜時代と地球環境—その進化と絶滅—. 地質ニュース 442, 41-54 (1991).
- (51) Wolfe, J. A. and G. R. Upchurch Jr. : Vegetation, climatic and floral changes at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Nature* 324, 148-152 (1986).

