福井県立恐竜博物館紀要 5：47–53（2006）
Ⓒ by the Fukui Prefectural Dinosaur Museum

映像資料「花を咲かせる植物の起源をたずねて －被子植物の起源と進化－」内の3次元動画CGの製作について

寺田和雄

福井県立恐竜博物館
福井県勝山市村岡町寺尾51-11

要　旨

平成16年度に映像資料「花を咲かせる植物の起源をたずねて－被子植物の起源と進化－」を福井県立恐竜博物館で制作した．その映像資料の中で製作した3次元動画コンピュータグラフィックス（CG)「被子植物と裸子植物の違い」と「植物の系統図」の詳細について報告する．

キーワード：被子植物と裸子植物の違い，科学教育映像，植物の受精，植物の系統図，重複受精，3次元動画CG（コンピュータ・グラフィックス）

TERADA, Kazuo (2006) Production of the 3D animations using computer graphics in the educational movie "Looking for the origin of flowering plants－the origin and evolution of Angiosperms－". Mem. Fukui Pref. Dinosaur Mus. 5 : 47 – 53.

An educational movie titled "Looking for the origin of flowering plants－the origin and evolution of Angiosperms－" was produced by the Fukui Prefectural Dinosaur Museum in 2004. In the movie, two 3D animations: "Differences between Angiosperms and Gymnosperms" and "Phylogenetic diagram of the land plants" were made using computer graphics. I report here about these 3D animations.

はじめに

福井県立恐竜博物館では，一般の観覧者に対してオンデマンドで放映する映像資料を毎年1本制作している．平成16年度は「花を咲かせる植物の起源をたずねて－被子植物の起源と進化－」のタイトルで制作した．

被子植物がいつ出現したか，最初の被子植物はどんなものであったか，被子植物の起源と初期進化は未だ謎となっている．1998年，中国の遼寧省北票市の地層から，最古の被子植物とされる化石が見つかった（図1）．その化石をSun et al.（1998）は，アルカエフルクトゥス・リァオニンゲンシス（*Archaefructus liaoningensis*）と名付け，さらに，2002年にSun et al.（2002）が別種のアルカエフルクトゥス・シネンシス（*A. sinensis*）を報告した．Sun et al.（2002）は，これら2種でアルカエフルクトゥス科（Archaefructaceae）を設立し，現生被子植物の姉妹群になるとした．

Fukui Prefectural Dinosaur Museum 51-11, Terao, Muroko-cho, Katsuyama, Fukui 911-8601, Japan
Phone : +81-779-88-0001, Fax : +81-779-88-8710
E-mail : k-terada@dinosaur.pref.fukui.jp

一方，分子系統学の発展に伴って，植物の系統分類は目覚ましく進歩し，特に1999年の現生植物の系統関係が示された論文（Qiu et al.，1999；Soltis et al.，1999）以降は，それ以前の教科書と大きく異なっている．その分子系統解析によって，現生植物の中で最も初期に分岐したのはアンボレラ科（Amborellaceae）のアンボレラ・トリコポーダ（*Amborella trichopoda*）であると考えられるようになった（APGII. 2003；Judd et al.，2002；Soltis and Soltis, 2004）．アンボレラ・トリコポーダは，南太平洋のニューカレドニアのみに遺存的に生育しており，本種1種のみでアンボレラ科を構成している（図2）．

このような研究の進展をふまえ，映像では中国遼寧省やニューカレドニアでの現地取材を行い（図1，2），被子植物の起源を追い求めている研究のホットな話題を映像化することを試みた．その中で「被子植物と裸子植物の違い」と「植物の系統図」の2つの3次元動画コンピュータグラフィックス（CG）やアルカエフルクトゥスの復元模型を製作した．アルカエフルクトゥスの復元模型の製作についてはTerada et al.（2005）で報告した．また，映像制作に関しては，寺田（2005）で簡単に紹介している．本報では，映像資料の中で製作した3次元動画CGの詳細を報告する．

図１．アルカエフルクトゥス・リァオニンゲンシス（*Archaefructus liaoningensis*）の発見現場での撮影（中国遼寧省北票市黄半吉溝村）

図２．A，アンボレラ・トリコポーダ（*Amborella trichopoda*）の撮影（ニューカレドニア，ドニー高原，標高700m 付近）；B，果実を付けたアンボレラ・トリコポーダ．

３次元動画 CG の製作

Ⅰ．「被子植物と裸子植物の違い」動画 CG

博物館の普及教室などで，一般の方に植物の進化や分類の話をする際に，被子植物とは何か，裸子植物とは何かを説明しなければ話に入れないことが多い．映像の中でも被子植物と裸子植物の違いを説明する必要があった．一般的に，被子植物の胚珠には２枚の皮（外珠皮・内珠皮）があり，全体が心皮（子房）に包まれているのに対し，裸子植物の珠皮は１枚で、むき出しになっている．つまり，被子植物は裸子植物に比べ，外珠皮と心皮の２枚の皮を多く持っていることになる（例えば，戸部（1997a）など）．これは被子植物と裸子植物のもっとも大きな違いである．さらに，加藤（1999）は，被子植物に特異的な新形質として，上記の「心皮」「２珠皮性」以外に「重複受精」をあげている．

一般的な教科書や啓蒙書では，被子・裸子植物における“花”（雌の繁殖器官）の違いを２次元的な図で表現することが多い（例えば，戸部（1994：図10.11））．このため，例えば，珠皮の開口部である珠孔という穴（被子植物の多くは花粉管の胚珠への侵入口であり，裸子植物の場合は花粉の胚珠への侵入口となる）を表現するにしても，２次元だと間隙のようにしか描けない．また，胚嚢内部の卵細胞など細胞も２次元的図では，立体的にどのような形や配置をしているかが理解しにくい．このことは，被子・裸子植物の“花”の内部構造を３次元的に表すことで，わかりやすくなるのではと考えた．また，被子・裸子植物の受精様式から種子形成にかけて動画で表現することができたら，被子植物の新形質である「重複受精」などがわかりやすくなると考えた．そこで，被子・裸子植物の“花”の内部（胚珠）と受精様式から種子形成にかけての３次元動画 CG を製作した（図３，４）．さらに，映像では，両者の動画を同一画面上に並べて対比し，両者の違いをわかりやすくするように工夫した（図５）．以下に，映像上では同一画面にある胚珠と受精様式の３次元動画 CG を，裸子植物と被子植物に分けて説明する．

１．裸子植物の胚珠と受精様式・種子形成

現生裸子植物には４つのグループが知られている。これらはグループごとに外部形態，胚珠の様子や受精様式が大きく異なるため，CG 製作にあたっては、国内でも一般的な裸子植物として球果類（針葉樹類）を参考に製作した（図３）．最初の図は球果類の若い雌花にし，種鱗をらせん状に配列させ，さらに２本対になった針葉をらせん状に配列させた（図３A）．胚珠の構造は，Gifford and Foster（1988：fig. 17-35，fig. 17-36A）と Stewart and Rothwell（1993：fig. 22.1）を参考にし，卵細胞（造卵器）は２つ持つよう表した（図３C）．花粉は気嚢を持たないものを想定した（図３D）．球果類の花粉粒は数ヶ月ないしは１年あまりかけて珠心の表面で成熟し，花粉管を伸長させるが，CG では表現できなかった．花粉管の伸長様式は，球果類では不定形になることが知られている（Gifford and Foster, 1988：fig. 17-31）．CG では不定形がうまく表現しにくいので，被子植物の花粉管と異なるテクスチャーとし，Gifford and Foster（1988：fig. 17-36A）のように折れ曲がって伸長するように表現した（図３E–F）．花粉管から放たれた２つの精細胞（造精器）のうち，１つの精細胞と１つの卵細胞との間で受精が行われる（図３I）．完成した種子は Gifford and Foster（1988：fig. 17-36B）を参考にした（図５B（左側））．

２．被子植物の胚珠と受精様式・種子形成

一般的な被子植物の胚珠と受精様式を表現するため，特定の種を取り上げることはせず，最初に花弁や萼片を持つ

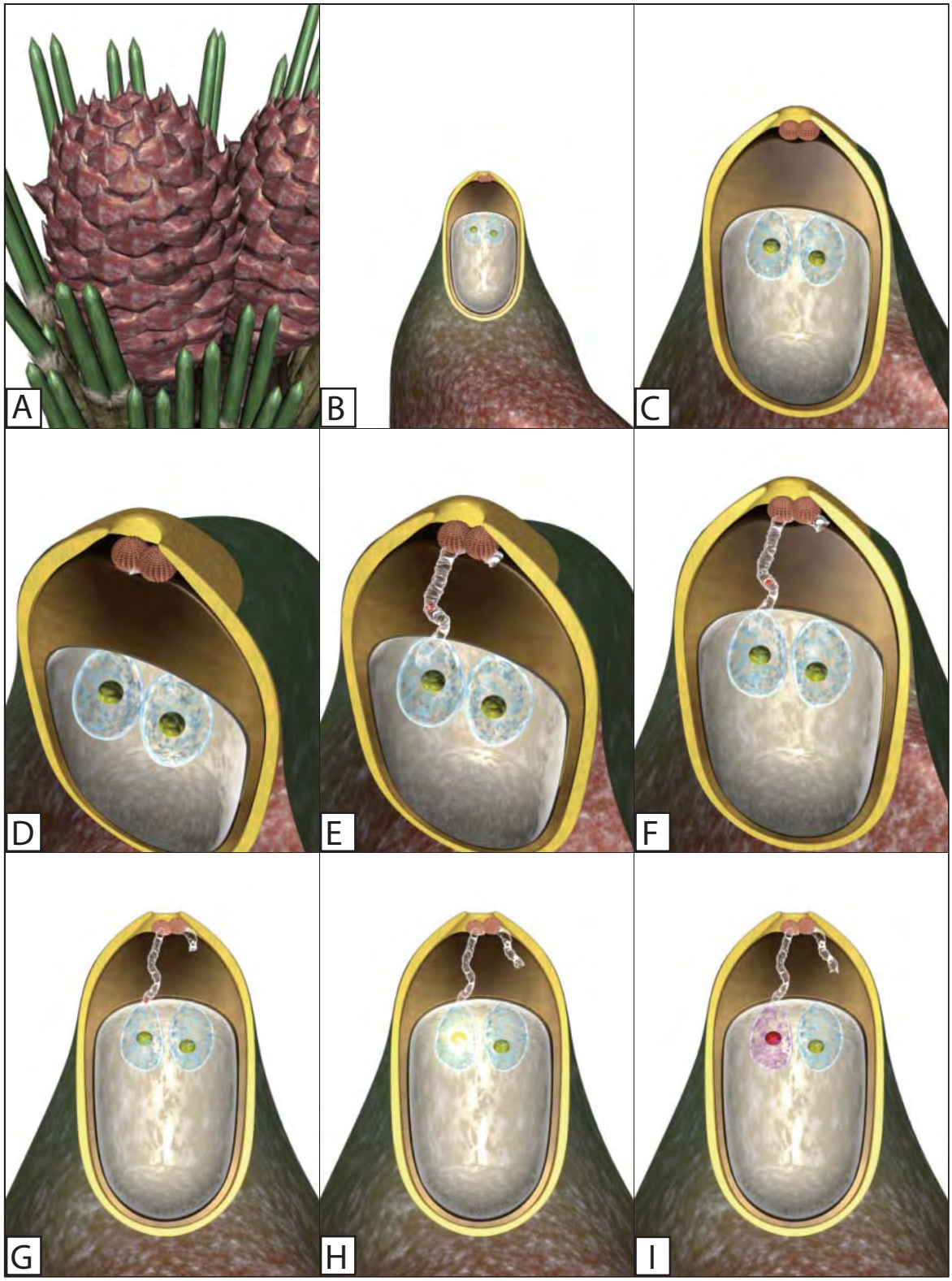

図 3．裸子植物の胚珠と受精様式の 3 次元動画 CG．A，球果類の若い雌花；B–C，1 つの種鱗の胚珠を拡大する；D，視点を正面から斜め上から眺めるようにして，珠孔を映す．珠孔内に 2 つの花粉粒が入っている；E–F，花粉から花粉管を伸ばし，精細胞（赤色）が卵細胞に向かう；G–I，視点を再び正面に向けて胚嚢内での受精の様子を示す．花粉管から放たれた 2 つの精細胞のうち，1 つ精細胞と 1 つの卵細胞との間で受精が行われる．（福井県立恐竜博物館映像資料「花を咲かせる植物の起源をたずねて－被子植物の起源と進化－」より）

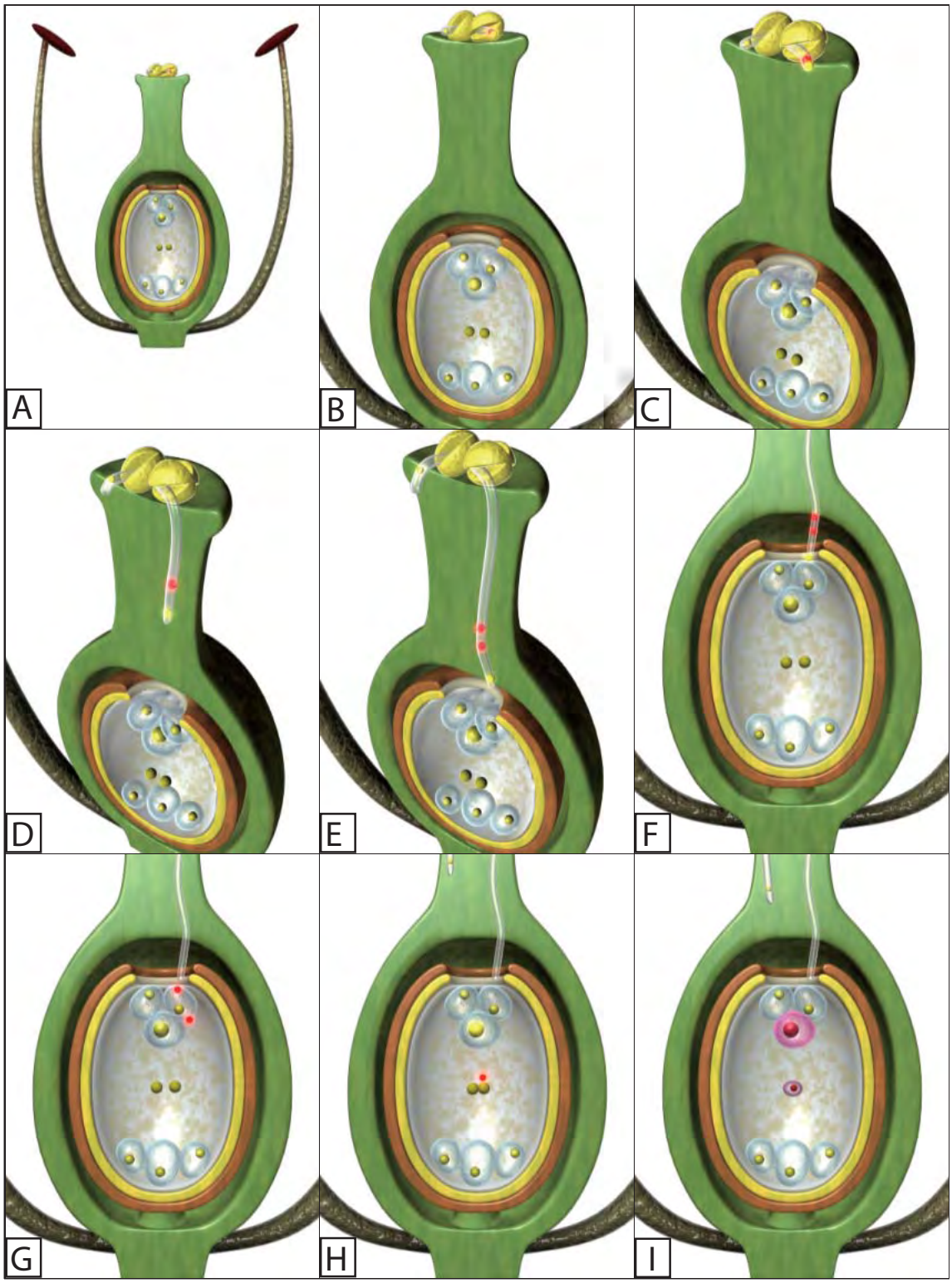

図４．被子植物の胚珠と受精様式の３次元動画 CG．A，花の内部を拡大する；B，胚珠を拡大する；C，視点を正面から斜め上から眺めるようにして，柱頭や珠孔の様子を映す；D，柱頭に付いた花粉から花粉管が発芽し，花粉管核（黄色）と精細胞（赤色）が確認される；E，花粉管は花柱の内部を通過し，精細胞が花粉管内で２つに分裂する；F–I，花粉管は珠孔を通って胚嚢の中に進入する．助細胞に到達した花粉管は先端が破れて花粉管核が消滅し，２つの精細胞は助細胞を介して，２個の精細胞を胚嚢内に放出する；H–I，２個の精細胞のうち，１つは卵細胞に，もう１つは極核に向かい，それぞれが受精する重複受精が行われる．（福井県立恐竜博物館映像資料「花を咲かせる植物の起源をたずねて－被子植物の起源と進化－」より）

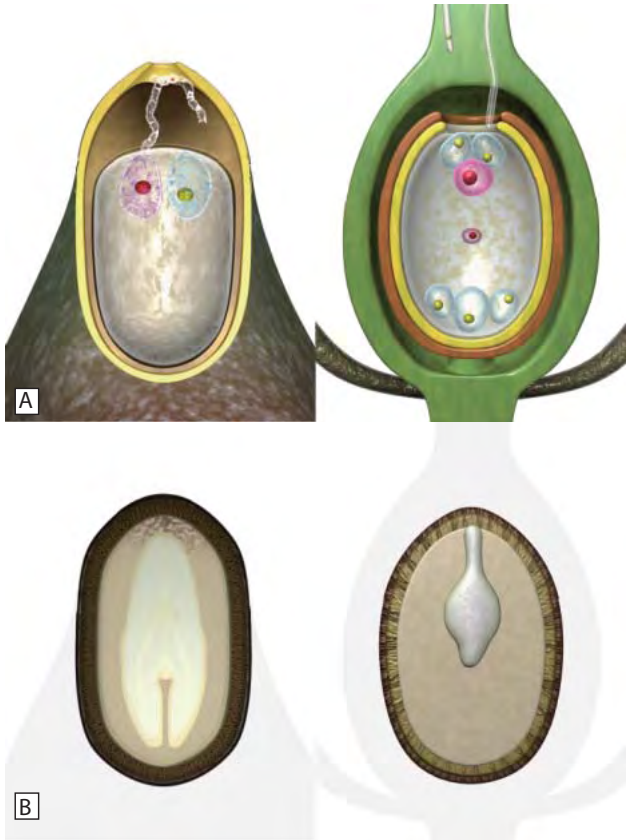

図５．裸子植物（左側）と被子植物（右側）の受精と種子形成の CG．**A–B**（左側），裸子植物では，１つの精細胞と受精した卵細胞は，胚に変化する；**A–B**（右側），被子植物では，卵細胞と精細胞の受精卵は胚に，２つの極核と精細胞が受精した方は胚乳に変わる．（福井県立恐竜博物館映像資料「花を咲かせる植物の起源をたずねて－被子植物の起源と進化－」より）

モデル的な花を映し，次にその内部を拡大した。ただし，胚珠に関しては，裸子植物との比較がしやすいように，被子植物でもっとも多い倒生胚珠ではなく，直生胚珠として表した（図４A）。また，胚嚢の構造は，もっとも一般的なタデ型（８核７細胞性：卵細胞１，極核２，助細胞２，反足細胞３つ）とした（図４B）．被子植物の内珠皮は，遺伝子の研究で，裸子植物の珠皮に相同であることがわかっているため，裸子植物と同じ黄色で彩色した．被子植物に固有な器官である外珠皮と心皮を別の色で彩色し示した（図４A）．胚珠が珠柄で心皮に接合する部分「へそ（hilum）」も描いた（図４A）．花粉は被子植物に最も多い三溝粒とした（図４C）．被子植物では，雌しべの柱頭で受粉がおこなわれると，すぐに花粉粒は発芽をはじめ，花粉管を伸長させる．花粉管内の花粉管核（栄養核）と精細胞（精核）の位置に関しては，一般的な教科書には，花粉管核が先で精細胞が後となっている（例えば，戸部（1997b：12-315）．しかしながら，精細胞が花粉管核よりも先に進むこともあり，一概に言えない（寺田，1984）．今回は混乱を招かないように，一般的な教科書に描かれてある花粉管核が先で精細胞が後になる場合を採用した．さらに，Gifford and Foster（1988：fig. 20-7）を参考に，精細胞が花粉管内で二つに分裂するように表現した．珠孔を通って胚嚢に侵入した花粉管では花粉管核が消滅し，２つの精細胞は助細胞の中を介して，１つは卵細胞に，もう１つは極核に向かい（図５A（右側）），それぞれが受精する重複受精が行われる（図４I）．この様子は Gifford and Foster（1988：fig. 20-22）や戸部（1997b）を参考にした．卵細胞と精細胞の受精卵は胚に，２つの極核と精細胞との受精した方は胚乳に変わるように表現した．さらに内珠皮は内種皮に，外珠皮は外種皮に変化するようにした（図５B（右側））．

Ⅱ．「植物の系統図」動画 CG

系統図というものも，一般の方が分かりにくいものの一つであるようである．一枚の図の中で，進化・系統という概念と地質年代的感覚が混在しているために理解しにくいと思われる．啓蒙書などには，さまざま植物の系統図が描かれている（例えば，西田（1998：p. 219）．それらは，植物のグループの出現時期や分岐場所など細かい点が異なっているが，大まかには一致している．今回は，加藤（1997）が，Friis et al.（1987）と Stewart and Rothwell（1993）を元にまとめた維管束植物の系統（加藤，1997：図２-２）を参考にした．また，映像の中では，「綱」という概念が一般の方に理解しにくいのですべて「類」に変更した（図６）．

３次元動画 CG では，地質時代が進むにつれ系統図が伸びていくようにし，植物のグループが，進化し，多様化し，絶滅している様子を，系統図上の目線で追っていくようした（図６A–I）．さらに，被子植物類が出てきたところで，上から全体の系統図を眺められる動画にした（図６J）．さらに，系統図が伸びて行く中で，それぞれ植物のグループのイラストが立ち上がってくるようにして，植物の姿をわかるように工夫した（図６A–I）．CG の中の背景や系統図，地質年代の色などもさまざま検討し，もっとも植物らしく見えやすいものを採用した．

おわりに

理科離れが進む昨今，次の世代の子供たちに，科学や自然，さらには植物学や古植物学という学問の素晴らしさや楽しさをいかに伝えられるかが我々の急務だと思う．今回の「被子植物と裸子植物の違い」と「植物の系統図」の２つの３次元動画 CG は，教科書などに図や文章で表現されていることを，いかに一般の方や子供たちに分かりやすく伝えることができるかという発想から始まった．私の知る限り，このような植物の構造や系統図の CG が製作されたことはない．一般の方がわかるだけでなく，専門家が見ても間違いのないものにするために，ここに紹介しなえかった様々な文献や電子顕微鏡写真などを参考にした．今回の映像をとおして，植物の進化や構造さらに生殖の神秘性などから，すこしでも科学や自然に興味を持っていただけたらと願う次第である．

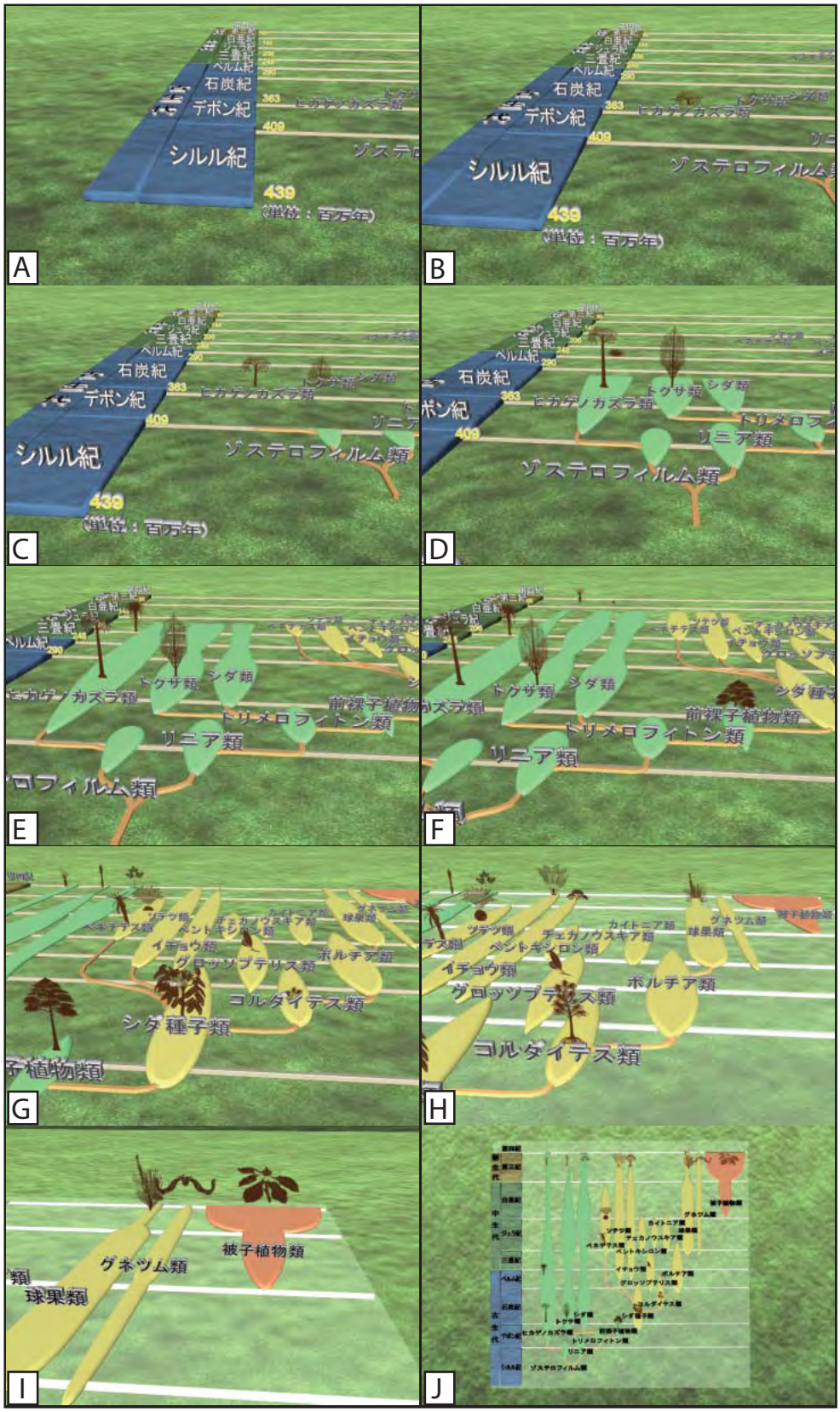

図 6．植物の系統図の 3 次元動画 CG
（福井県立恐竜博物館映像資料「花を咲かせる植物の起源をたずねて－被子植物の起源と進化－」より）

謝辞

この映像制作では，制作委託会社である FBC アドサービス株式会社の森下芳憲氏，渡辺敏明氏，箕輪義之氏には，私のわがままな注文に応えて頂いた．また，CG 製作会社 Prism の石橋弘氏と平井育世氏には，毎回のように深夜を過ぎるまで CG の手直しに付き合って頂いた．心から深く感謝申し上げる．

また，粗稿を査読し，有益なご助言を与えられた糸魚川淳二博士および査読者の方々に感謝する．

引用文献

APGII. 2003. An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APGII. Botanical Journal of the Linnean Society 141 : 399–436.

Friis, E. M., W. G. Chaloner and P. C. Crane (eds). 1987. The Origins of Angiosperms and their Biological Consequences. Cambridge University Press, New York, 358pp.

Gifford, E. M., and A. S. Foster. 1988. Morphology and Evolution of Vascular Plants. Third edition, W. H. Freeman and Company, New York, 626pp.

Judd, W. S., C. S. Campbell, E. A. Kellogg, P. F. Stevens and M. J. Donoghue. 2002. Plant systematics: a phylogenetic approach, second edition. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, 576pp.

加藤雅啓. 1997. 陸上植物の多様性；pp. 1–40, 岩槻邦男・馬渡峻輔（監）・加藤雅啓（編）, バイオディバーシティ・シリーズ 2 ：植物の多様性と系統．裳華房，東京．

加藤雅啓. 1999. 植物の進化形態学．東京大学出版会，東京, 242pp.

西田治文. 1998. 植物がたどってきた道．NHK ブックス，東京, 223pp.

Qiu, Y. L., L. Lee, F. Bernasconi-Quadroni, D. E. Soltis, P. S. Soltis, M. Zanis, E. A. Zimmer, Z. Chen, V. Savolainen and M. W. Chase. 1999. The earliest angiosperms: Evidence from mitochondrial, plastid and nuclear genomes. Nature 402 : 404–407.

Soltis, P. S., D. E. Soltis and M. W. Chase. 1999. Angiosperm phylogeny inferred from multiple genes as a tool for comparative biology. Nature 402 : 402–404.

Soltis, D. E., and P. S. Soltis. 2004. *Amborella* not a basal angiosperm? Not so fast. American Journal of Botany 91 : 997–1001.

Stewart W. N., and G. W. Rothwell. 1993. Paleobotany and the Evolution of Plants, Second edition, Cambridge University Press, New York, 521pp.

Sun, G., D. L. Dilcher, S.-L. Zheng and Z.-K. Zhou. 1998. In search of the first flower: a Jurassic angiosperm, *Archaefructus,* from Northeast China. Science 282 : 1692–1695.

Sun, G., Q. Ji, D. L. Dilcher, S.-L. Zheng, K. C. Nixon and X.-F. Wang. 2002. Archaefructaceae, a new basal angiosperm family. Science 296 : 899–904.

寺田和雄. 1984. 花粉管中の精核と花粉管核の位置．第36回大阪府高等学校生徒生物研究発表会資料．大阪府高等学校生物研究会．

寺田和雄. 2005. 映像資料「花を咲かせる植物の起源をたずねて－被子植物の起源と進化－」の制作と最古の被子植物 *Archaefructus* の復元模型の公開．日本植物分類学会ニュースレター 18：6–9．

Terada, K., G. Sun and H. Nishida. 2005. 3D models of two species of *Archaefructus,* one of the earliest angiosperms, reconstructed taking account of their ecological strategies. Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum 4 : 35–44.

戸部博. 1994. 植物自然史．朝倉書店，東京, 188pp.

戸部博. 1997a．花の起源と進化．週刊朝日百科 植物の世界 142：12-290–12-292．

戸部博. 1997b．種子－発生と基本構造，進化．週刊朝日百科 植物の世界 142：12-315–12-317．