

# 古生物学の現状と将来：基礎理学の重要性に鑑みて

第18期日本学術会議古生物学研究連絡委員会

学術の社会に対する責任が問われている。古生物学は、政策に考え方を反映させることや、社会に影響を与える事ができるのだろうか？ 本報告書では古生物学の学問としての性格をまとめ、社会で果たしうる役割について議論する。

## 1. 知の創成（新しい地球-生命観の創成）:

「地球はほかの天体と違ってどうしてこのように生物に満ちた星になったのだろうか？」という問いは、生物がどのように生まれ、どのように多様になってきたのかという起源と歴史を探る意味で本質的である。この問いは、また、地球がどのように惑星として生まれ、ダイナミックに変動を繰り返しながら進化してきたのかを知る事と同列のテーマである。この問いに答えるためには地球史、生命史の解明がぜひとも必要であり、科学者は答える義務がある。

古生物学は、生物がどのようにして地球上に現れ、地球環境の変遷に伴ってどのように適応し、絶滅し、また多様に進化してきたのかを、おもに地層に残された生物遺骸あるいは活動記録から明らかにしようとする分野である。生物遺骸や活動の記録は形態や物質として残されていることが多いので、古生物学は物質科学と生命科学、双方にまたがった領域である。現生生物の形態や遺伝子には過去の情報が残されているので、その「太古の記録」を読み解くことも古生物学の守備範囲である。また、46億年におよぶ地球史の初期に出現し存在しつづけている生物の記録を記載し、時間の順序に並べながら生物進化を読み解き編纂するという意味では歴史科学の一翼も担っている。まさに、自然科学のみならず人文・社会科学にも視野を広げた総合科学であるといえる。

古生物学は、野外の地層から化石を採集することから始まる博物学として進展した。その後の科学・技術の発展に伴い、さまざまな分析解析の手法が導入されて、現代に生きる科学となっている。たとえば、顕微鏡や電子顕微鏡が発明されたことにより、肉眼では見る事が出来なかった微古生物学の世界が広がったようにである。同位体質量分析計や微小領域分析装置の発明・開発により、古生物試料を用いて過去の古水温や極域の氷床量の推定が可能になり、定量的な古海洋研究が発達した。形態を記述する数学が発達したことにより、形態を数学的に記述できるようになり、形態進化を論理的に議論できるようになった。また、大型生物骨格の微量元素や同位体を成長に従って測定することによって、どこに生息していたのか？ 何を食べていたのか？ また、変温動物だったのか？ 恒温動物なのか？ という過去の生物の生態を赤裸々に復元することができるようになった。さらに現代では、コハク試料や氷漬けマンモス化石中の遺伝情報を読み出すことが出来るようになり、遺伝子レベルで系統や進化を語れるようになってきている。一方、20世紀後半の生命科学の進展にともない、生物の進化の理解に別のアプローチが参入してきた。分子進化学である。現生生物が持つ遺伝情報を解析して、そ

こから生物の進化を繙こうとする分子系統学が盛んに行われている。遺伝子解析から描かれる分子系統樹は、遺伝子配列の類縁性から近いもの同士を結びつけてゆくことによって、基本的には構築される。また、生物の分岐や進化は、塩基置換がほぼ一定の速度で進行すると考えられている遺伝子群を解析して、その置換数に基づいて遺伝子距離を推定することによって議論する。分子進化に用いられる遺伝子群は、たとえば、ミトコンドリアであり、また RNA のリボゾームをコードする領域である。このようにして、分子系統学は、地球上における生物の歴史を、きわめて明快な理屈のもとに復元している。20 世紀の物理学を頂点とする要素還元論的な論理の面目躍如というところである。このように推定された分子系統学で構成された生命史が過去の化石記録から編纂される古生物学の結果と整合的であれば問題はない。

しかし、いくつか整合的でない点がある。一つは、化石記録と分子時計との時代差が大きい分類群がいくつかあることである。大抵は、形態情報よりも分子進化の方が先行する例が多い。つまり、分子系統は化石記録よりも生物の出現時期が早くなっているということである。このことは、生物の痕跡が地層に保存されにくいという、化石記録の不完全性で説明できる。たとえば、鳥類のように、分子記録に対して形態記録があとから進化したことを示す記録の溝は、その後、世界各地からさまざまな化石が発見されたことによって埋まってきた<sup>1)</sup>。また、有孔虫、珪藻、石灰質ナノプランクトンなどの原生生物の場合は、化石記録と分子系統とのギャップが大きく、数億年にも及んでいる<sup>2)</sup>。これは、分岐年代を推定する際に用いる分子時計が進みすぎているのか<sup>3)</sup>、あるいは有殻原生生物はその系統の前半には細胞表面に殻を沈着しなかったために、化石記録としては残らなかった可能性があるということによって説明できる。二つ目のパラドックスは、形態的にはきわめて類似した種群が遺伝的にはいくつかの異なったグループに区別されることがあることである。原生生物である有孔虫類にみられる「隠蔽種 (cryptic species)」がその代表的な例である<sup>4)</sup>。これは、有孔虫の殻形態が遺伝だけでなく、周りの環境に適応するための機能をも表現することに起因する。そのために、遺伝的には異なった生物群であっても生息場所の類似性から、形態の収斂が起こったものとして理解される。このように記述すると、分子系統の研究は生命史の理解に万能であって、古生物学の化石記録はそれを補強しているように見える。しかし、本来、古生物学と分子系統学は視点と役割が異なっており、相互補完的である。たとえば、分子系統が得られた分類群については、その情報から形態分類や系統進化に重要な形質を選び出したり、その形質の進化が議論できるという利点がある。一方、分子系統についても、化石記録に基づいて分子系統の妥当性を議論したり、分子進化の時計を地球史時計とアジャストできるのである。

古生物学の基本は、生物の適応放散や進化の歴史を形態、分子、行動などの痕跡に基づいて記述することにある。とくに、生物の形態進化は、遺伝的な複雑さの過程を理解するだけでなく、地球史、生命史の過程で、生物が形態を機能的にして、環境の変遷に適応してきたのかを理解することでもある。このような展望から、古生物学は、interdisciplinary あるいは multidisciplinary な学術研究の展開が必要である。しかし、現状は、個々の分類群や狭い研究領域の発展には貢献しているものの学際的、統合的な展望と対応がなされているとはいえず、依然として変動する地球史と生命史がどのように関わり、ダイナミックに進化を遂げてきたのかという地球-生命進化の全体像は明らかにな

っていない。

最近、地球・生命史解読の追い風となるインフラや研究計画が整ってきた。「IODP」、  
「ICDP」に代表される掘削科学、「地球シミュレーター」に代表される計算機科学、「ス  
プリング8」の物質科学であり、「ヒトゲノム全解読」のバイオサイエンスである。また  
「ガイアリスト21」、「Biodiversity Program」、「Census Data Project」など地球上の生物多  
様性を全て記述するプロジェクトである。掘削科学では、地球進化の様々な段階に地下  
の微生物が関与していることを大陸あるいは海底下の地層・岩石を掘削することによっ  
て証明しようとしている。たとえば、沈み込むプレート周辺の揮発性元素の循環に微生物  
が作用していることや、また、地震発生帯の割れ目にバクテリアフィルムができる事  
によって、地下の岩石の滑り摩擦を解放させる役割をしているなどである。「スプリング  
8」では地球や生命物質を分子あるいは原子レベルで解析することができるために、地  
球・生命物質を構成する分子、原子に残された過去の情報を読み出すことが出来よう。  
また、地球シミュレーターは、過去の地球環境の変化を極めて精緻に復元し描き出すこ  
とができる。さらに生物学では、たとえば、進化を語る上でモデルとなる生物の全ゲ  
ノムを解読し、殻形成にかかわる遺伝子領域を解析することを通じて、生命史のなかで  
重要なイベントである生鉱物化作用の発現と多様化が持つ意味をゲノムレベルで理解で  
きるようになる。また、地球上の主要な生物を形態、生態、遺伝子について整理するこ  
とによって、生物多様性の進化をさまざまな視点を複合して議論できるようになる。

これらの国家的研究計画を支援するとともにそれぞれに積極的に参加することによっ  
て、地球史、生命史の理解をリードでき、その結果として、古生物学の研究がいかに重  
要であるのかをアピールできる。もちろん、自ら研究計画を提案し、リーダーシップを  
取れることが望ましい。

## 2. 知の伝承（地球-生命試料の保存活用と研究者の育成）:

上記の問いに答えるためには、地球史、生命史を研究する素材研究と学術研究を推進  
する人材が必要である。すなわち、地球物質資料、化石標本などが系統的に分類保存し  
てある事が重要であり、そのための仕組み（資料館や博物館など）が必要である。また、  
これらの研究を行う研究者の育成がもう一方で必要である。

古生物学の研究対象は化石であり、また生物源化合物を含んだ堆積岩などの地球物質  
である。現考古生物学は、生きている生物を研究対象とするので、生物も重要な古生物  
学の研究対象となる。研究に用いる試料は、研究者が自らフィールドに出かけて調査し、  
日常的に採取することが多いが、地球掘削、潜水調査、宇宙探査などの最新先端機器を  
用いて重点的に採取されることもある。研究資料はそれだけに重要であり、整理した上  
で永久に保管する必要がある。ことに、新しい化石種として記載された資料と標本は、  
失われてはいけない人類の財産である。第17期古生物研究連絡委員会は、日本におけ  
る各分類群の模式標本の現状を調査し、リストアップした<sup>5) 6) 7)</sup>。その調査過程で、問  
題点が浮かび上がってきた<sup>8)</sup>。たとえば、戦争や火事、地震災害などによって破損したり、  
また研究機関が研究標本に無関心なために標本類が劣悪な保存状況に置かれて風化  
が進行していたり、場合によっては紛失している事が指摘された。現在、標本・資料の  
多くは大学や博物館に保存されているが、将来にわたって保存していくための継続的な

物心両面からの支援体制が必要である。とくに、保存する場である博物館、資料館、あるいは収納庫の確保とそれらを整理するキュレーティングスタッフがコンスタントに供給されていることが不可欠である。研究試料の保管に対する考え方と実行状況は、国家の文化水準を測るものさしになる。日本の現状は、残念ながら世界の二流であり、文化国家とは言えない事を憂慮する。

古生物学の学術研究には、時間と経験が必要である。これは研究者を育成する場合にも同様である。このためには十分な学識と経験を持った専門家が、基礎から最近の高度な科学に至るまでシステマティックに教授する場が必要である。本来、人材を育てるべきアカデミアの大学は、独立行政法人化の嵐の中で、効率主義と応用主義に傾いている。このような薄っぺらな競争原理に基づいた社会で、古生物学の研究者を育てることは容易ではない。各大学、博物館、独立行政法人研究機関などが連携して人材育成を行う時にきている。俯瞰的視点からの助言と実行が必要である。

さらに、基礎理学の教育は人間の一生を通じて行われなければならないことである。たとえば、青少年への動機付けとして、初等・中等教育における古生物学を含めた自然史教育が重要になる。自然史的な考え方、基本的な生物多様性（分類、系統、進化）の現状と成り立ち、そして重層的なシステムを構成している地球と生命が織りなす自然の姿を好奇心に満ちあふれた青少年に教え、その地球-生命観を身につけてもらうことが効果的である。また、生涯教育の一環として、博物館・公民館・カルチャーセンターにおける一般市民に対する社会教育が重要である。さらに大事なことは、重層的な地球生命観を身につけさせる視点から学校教育・社会教育を指向する教育行政が行われることである。そのためには、「基礎理学がいかに人間生活を精神的に充実したものにさせてくれるのか！」という認識を、一般市民が常識として支持してくれるような状況を作り出さなければならない。このためには、たいへん遠回り地道な努力が必要になる。数年以内の短期間で成果を求める応用研究のライフサイクルではなく、長期的な展望に立った教育が展開されることが、基礎理学の発展に何よりも大切なことである。

### 3. 知の伝搬(地球環境問題を解く鍵としての地球環境変遷史と生物の役割

#### の解明):

地球環境の変遷に伴って、生物は絶滅し、また適応してきた。とくに無酸素、極端な低温や高温などの極限的な環境をくぐり抜けてきた。一方で、人間の活動は自然を擾乱し、人工的に極限環境をつくり出している。人為的に生み出した極限環境を評価し、それからの修復を試みることが必要である。過去の極限的な環境変動と生物の振る舞いを理解している古生物研究者の存在意義と活躍できる場がある。いくつかの具体的な例をあげる。

(1)沿岸汚染の評価： 水俣、アドリア海北部をはじめとする工業先進国の沿岸では、深刻な重金属汚染が起こっている。また、都市近郊では、生活廃水に基づく富栄養化や人工有機物汚染が目立つ。これらの汚染がいつ頃からどのように起こり、そして現在どのような状態であるのかという環境汚染の記録の解読とその評価には古生物学者の知識が必要である。古生物学は、生物の骨格に残された環境記録を読み解くことを日常的に

行っているからである。とくに、環境変化に鋭敏な生物を用いることによって、詳細な解読が可能になるはずである。

(2) 地球環境問題への発言： 20世紀末から、人間活動に伴う人為的な地球温暖化が進行している。この温暖化のメカニズムは解明されており、さまざまなシミュレーションが行われている。どのシミュレーションも時間と共に一方的に気温が上昇する結果を示しており、どこで人為的な地球温暖化の暴走が止まるのかを予想している例はない。地球環境変動史は、自然状態では何度も地球環境が暴走しかけたが、揺り戻しがあったことを示している。どのような条件が揃えば、人為的な地球温暖化の暴走を止められるのだろうか？ このネガティブフィードバック現象は地層中に記録として残されているため、自然が行った地球温暖化の暴走とそのネガティブフィードバックの実態を地層から読み解き、そのメカニズムの概要を把握している地球科学者は有利である。

(3) 地球環境に適応した自然観： 人類は地球環境システムを構成する生態系の一員として生存することを求められている。どのように？ 生態系を維持するにはどうするのか？ などの問いに答えられるのは、古生物学である。たとえば、人間活動がいかに自然に影響を与え、環境を変化させてきたのかという人類による自然改変の記録は、第四紀堆積物を解析することを通じて読みとることができるからである。

(4) 地球史における生物の役割を語る： 最近の地球惑星科学は、地球システムを明らかにしている。その中で生物は地球システムの一部として扱われている。地球という場で生命が生まれ、生物が進化することによって地球システムが影響を受けているのであるから、当然のことである。ただし、地球科学者の多くは、生物を地球の付属物として取り扱っている。もっと地球に対して対等な存在として、生物を評価する必要がある。生物が地球環境変遷史に積極的に果たした役割を語るべきである。

#### 4. まとめ

本対外報告書は、基礎理学の一員である古生物学の性格をまとめ、当該研究が置かれている現状を述べた。古生物学は、「生き物に満ちた星」地球とそこに住む生物多様性の成立過程を理解する自然史科学の重要な分野を占めており、研究の発展に大いに貢献している。一方、地球と生物は密接に絡み合いながら変遷を遂げ、進化していることから、地球環境システムにおける生物の役割を正當に評価することが必要である。しかし、この方面における古生物学の貢献は多いとはいえない。これからの積極的な貢献が望まれる。

古生物学を始めとする基礎理学は人間の知的好奇心を原動力として発展する、目的志向型ではない学問領域である。目的科学に対して、無目的科学と言っても良い。これらの学問を、一定の期間に定量的な目標に向かって走る目的科学と一緒に評価することは、基礎理学の衰退を招くことになる。これは、ひいては基礎理学の成果の上に立つ目的科学の足腰を弱める結果にもなる。以上を鑑み、長期的な展望に立った、複合的な施策が必要である。ただ、基礎理学であっても、学問の成果を社会に還元することは可能である。科学者は意識的に研究成果を社会に向かって発言する努力をすべきである。

## 5. 引用文献

- 1) Smith, A.B. and K.J. Peterson, 2002, Dating the time of origin of major clades: molecular clocks and the fossil record. *Annual Reviews in Earth and Planetary Sciences*, **30**, 65-88.
- 2) Pawlowski, J., M. Holzmann, C. Berney, J. Fahrni, A. J. Gooday, T. Cedhagen, A. Habura and S.S. Bowser, submitted, Molecular evidence for a large Precambrian radiation of non-fossilized Foraminifera. *Science*,
- 3) Pawlowski, J., I. Boliver, J.F. Fahrni, C. de Vargas, M. Gouy and L. Zaninetti., 1997, Extreme difference in rates of molecular evolution of Foraminifera revealed by comparison of ribosomal DNA sequences and the fossil record. *Mol. Biol. Evol.*, **14**(5), 498-505.
- 4) Huber, B.T., J. Bijma and K. Darling, 1997, Cryptic speciation in the living planktonic foraminifer *Globigerinella siphonifera* (d'Orbigny). *Paleobiology*, **23**(1), 33-62.
- 5) Ikeya, N., H. Hirano and K. Ogasawara, eds, 2001: The database of Japanese fossil type specimens described during the 20<sup>th</sup> Century. *Palaeontological Society of Japan, Special Papers*, no. 39, 500 pp.
- 6) Ikeya, N., H. Hirano and K. Ogasawara, eds, 2002: The database of Japanese fossil type specimens described during the 20<sup>th</sup> Century (Part 2). *Palaeontological Society of Japan, Special Papers*, no. 40, 569 pp.
- 7) Ikeya, N., H. Hirano and K. Ogasawara, eds, 2003: The database of Japanese fossil type specimens described during the 20<sup>th</sup> Century (Part 3). *Palaeontological Society of Japan, Special Papers*, no. 41, 360 pp. (in press)
- 8) 小笠原憲四郎, 2003, 20世紀に記載された日本の化石タイプ標本データベース 第1巻 第3巻. 学術の動向