

流行に左右される要因論

—スノーボール・アースとカンブリア爆発の要因論をめぐる—

森 幸 也

§ 1. はじめに

20世紀の後半以降、地球の歴史や生物進化の研究領域では、それらの歴史の具体的な展開の様相が、より詳細に把握されるようになってきた。それにつれて、地球や生命の変遷は必ずしも漸進的ではなく、ときに突発的に劇的な変容を被ることも、了解されてきた。

そのため、46億年に及ぶ地球と生命の歴史には、いくつかの注目すべき特異的な時期・事象があった、との認識が共有されつつある。冥王代における大気や海洋の形成や、約40億年前の生命の誕生、約20億年前の真核生物の誕生、何度か起こった超大陸の形成や生物の大量絶滅などが、その特異事象の代表例である。

そのような、遙かな過去の具体的な事件が少しずつ明らかになってきている一方、それらがどのような因果関係やメカニズムで、なぜその時期に生じたのか、といった「要因論」に関しては、定説不在の事象も多い。

そもそも、地質学的年代のスケールでの出来事に関しては、あるひとつの要因論が最も妥当であると証明するのは困難であり、また逆に、誤りであると否定するのも容易ではない。現時点で与えられた諸データに基づき、現在の自然科学の理論や知見と矛盾しない、という条件を満たせば仮説として成立するため、複数の仮説が論理的には併存可能だからである。また、どのような理論であっても、その時代の多様な細部に至るまで全面的に整合的に説明できるとは限らないため、少々の反証事例が見つかったとしても、その仮説をすぐさま棄却できるわけではない。

それゆえ、そのような特異事象に関する「要因論」が、諸説紛々とした様相を呈するのは、必然とも考えられる。そして、併存する複数の仮説のそれぞれには、異なる自然観や思想的な背景が多少なりとも影響を及ぼしているであろう。さらにその背景は、その理論が生まれた時代の潮流と密接に絡み合っている場合も多いのではないだろうか。

さてこの論考では、そのような地球と生命の歴史における代表的な特異事象を2つ取り上げ、それらの「要因論」の変遷に注目して、考察を進めていく。

その2つの事象とは、原生代に数度到来したとみられる超氷河期、「スノーボール・アース」と、古生代初期の短期間での生物の爆発的進化、「カンブリア爆発」である。

双方とも、その要因論が複数併存し、過去20年ほどの間に主流となる考え方が揺らいできた。ここでは、その要因論の変遷を確認したうえで、要因論の形成に対する時代の影響や、暗黙の思考パターンの作用を探っていきたい。

こうした地質年代規模の研究領野における仮説は、しばしばその時代の流行となる考え方—思考枠組—に左右されることがあるように、筆者には思われる。

§ 2. スノーボール・アースの要因論への地球温暖化論の影響

1990年代に、地球科学の分野で、「スノーボール・アース」という仮説が登場した⁽¹⁾。

「スノーボール・アース」仮説とは、地球の歴史における原生代（25～5.4億年前）に、複数回、地球の表面ほぼすべてが、赤道付近まで凍りついてしまったことがある、という推測である。時期は、約23億年前（原生代初期）と、7～6億年前頃（原生代末期）、それぞれの期間中、2回以上、スノーボールとなった可能性があるらしい。

超氷河期が存在した根拠としては、氷河堆積物が当時の赤道付近まで存在することや、炭素13同位体の成分比が異常に低かったこと（生物の活動の全面的停止を示す）、などが挙げられている⁽²⁾。

地球の歴史において、そのような超氷河時代が存在した、という事実認識は、現在ではほぼ通説となっている。だが、どのようなメカニズムでスノーボールに到ったのかという要因についての説明は、この十数年で大きく様変わりし、対立する諸説が併存している。

この節では、その要因論の変遷が、多少とも「流行」に左右されていた、という見方を提起してみたい。

さて、全球凍結時の地球の平均気温は -40°C 、海の氷の厚さは平均で1400m程度、と推定されている。

ある程度まで地球の気温が低下すると、雪氷面積が広がるため、太陽光をより反射するようになり、ますます地球が冷えていく、という、正のフィードバックが働き、地球が全面的に凍りついてようやく、新たな平衡状態に落ち着く、と考えられる。

では、その臨界点となる気温まで地球を冷やした主原因は何だったのだろうか。

それに対しては、いくつかの仮説が提案されている。それらのうち、2種をピックアップしてみる。

A. 地球規模での炭素循環の変動による、二酸化炭素やメタン濃度の急激な変化

B. 地球に降り注ぐ銀河宇宙線の増大

1990年代から2000年頃、「スノーボール・アース」が成立したか否かをめぐる論争期に、提唱者のひとりのホフマンや日本での紹介者たちは、Aの仮説で、全球凍結にいたる寒冷化や、全球凍結からの回復を説明できる、と考えていた⁽³⁾。

炭素循環の変動とは、長期的な火山活動の低下や、地表の風化の進行に伴う有機物の埋蔵量の増大などを指す。それらによって、大気中のCO₂濃度がある水準以下になってしまう、といった筋書きが、その仮説である。

筆者の考えでは、この仮説にはふたつの弱点がある。

ひとつは、「二酸化炭素濃度の変動が地球の気温の動向を決定的に左右する」という理論を自明の大前提として、批判的吟味を行っていないこと。この地球温暖化説の議論に用いられた前提に対しては、1990年代末頃より、多くの論者から批判的見解が提起されている⁽⁴⁾。

もうひとつは、歴史的に確認するのが不確実な、火山活動の低下や有機物埋蔵量の変動を導入して、無理やりCO₂と気候変動の枠組に乗せようとしていることである。地球が寒冷化していたのなら、二酸化炭素濃度が低下していたからに違いない、という憶断が、研究者たちの思考習慣となっており、そのCO₂低下を招いたであろう要因を、恣意的に捻出しようと試みていたのではないだろうか。

こうしたことから、要因論に関する仮説Aは、当時の地球温暖化をめぐる議論から、多大な影響を受けていた、と筆者には思われる。

筆者は、1990年代の頃から、二酸化炭素濃度の変動が地球の気温の動向を決定的に左右する、というCO₂主原因説の前提となる考え方に懐疑的であったため、仮説Aで超氷河期の到来を説明するには無理がある、と判断していた。

スノーボール・アースの研究者たちはおそらく、地球温暖化についてのCO₂主原因説に対して念入りの検討はせず、当時の流行の学説を無批判に受け入れ、自分たちの研究テーマに適用してしまったのではないかと筆者は推測している⁽⁵⁾。

ある程度、科学的リテラシーのある者ならば、CO₂主原因説に対する批判的検討を行えば、その理論の根拠が十分ではないことが容易に見えてくるはずである。少なくとも、安易に自らの学説の核心部分にCO₂主原因説の大前提を導入することには、躊躇するのではないだろうか。

それゆえ、スノーボール・アースをめぐる仮説Aは、当時の地球温暖化説の前提を吟味せずに採用した仮説であった、と現在では見做すことができるであろう。

では、1990年代末に登場し、近年も議論が重ねられつつある仮説、Bはどうだろうか。

この仮説Bも、仮説Aと同様に、理論的には、地球温暖化の要因論との関わりがある。ただし、CO₂濃度の増減を気候変動の主要因とはみなしていない。

仮説Bにおいては、超氷河期の到来も、20世紀や過去数世紀間の地球の気候変動についても、太陽活動の変動と、銀河からの宇宙線の動向とによって、基本的には説明可能である、という理論枠組に立脚している。

その枠組では、20世紀の地球温暖化については、太陽活動が活発な時期には太陽圏における太陽風が強くなり、地球に降り注ぐ銀河宇宙線の量を減らすため、低層雲の形成率が低下し、地球の平均気温を上げる、との説明がなされている。スベンスマルクや桜井邦朋氏らが提唱している理論である⁽⁶⁾。

スノーボールについては、以下のような説明が、スベンスマルクや片岡龍峰氏らによってなされている⁽⁷⁾。

原生代初期の全球凍結については、その引き金として、地球史上最大のスターバースト—短期間に大量の星が形成される現象—が考えられている。23億年前は、銀河における星の形成率が高かった時代であったことが、恒星の年齢分布から確認される。

そのため、当時、大量の銀河宇宙線が地球に降り注ぎ、地球大気のイオン化が促進され、雲核も形成しやすくなり、低層雲の量が増大したであろう。その結果、太陽光に対する反射率が増大し、気温の低下が進行していった——このような因果関係である。

原生代末期については、[スターバースト] + [地球磁場の衰弱] が引き金になった、と推測されている。その結果、23億年前の場合と同様に、地球に到来する銀河宇宙線の増大によって、気温の低下が引き起こされた、と説明される⁽⁸⁾。

筆者には、Aの仮説よりも、こちらの仮説Bの方が、説得力があるように思われる。

その理由は、仮説Aの場合、無理やり二酸化炭素濃度が減少する要因を探し出して、証拠不十分なまま推論に推論を重ねているのに対して、仮説Bでは、スノーボールという地球史的イベントとほぼ同時期におこった、宇宙における顕著な特異事象とを結び付けて考察しているので、恣意性が感じられず、自然な説明になっているからである。

ただし、やはりこちらの仮説Bも、地球温暖化の要因論争の余波を受けているのは確かであろう。

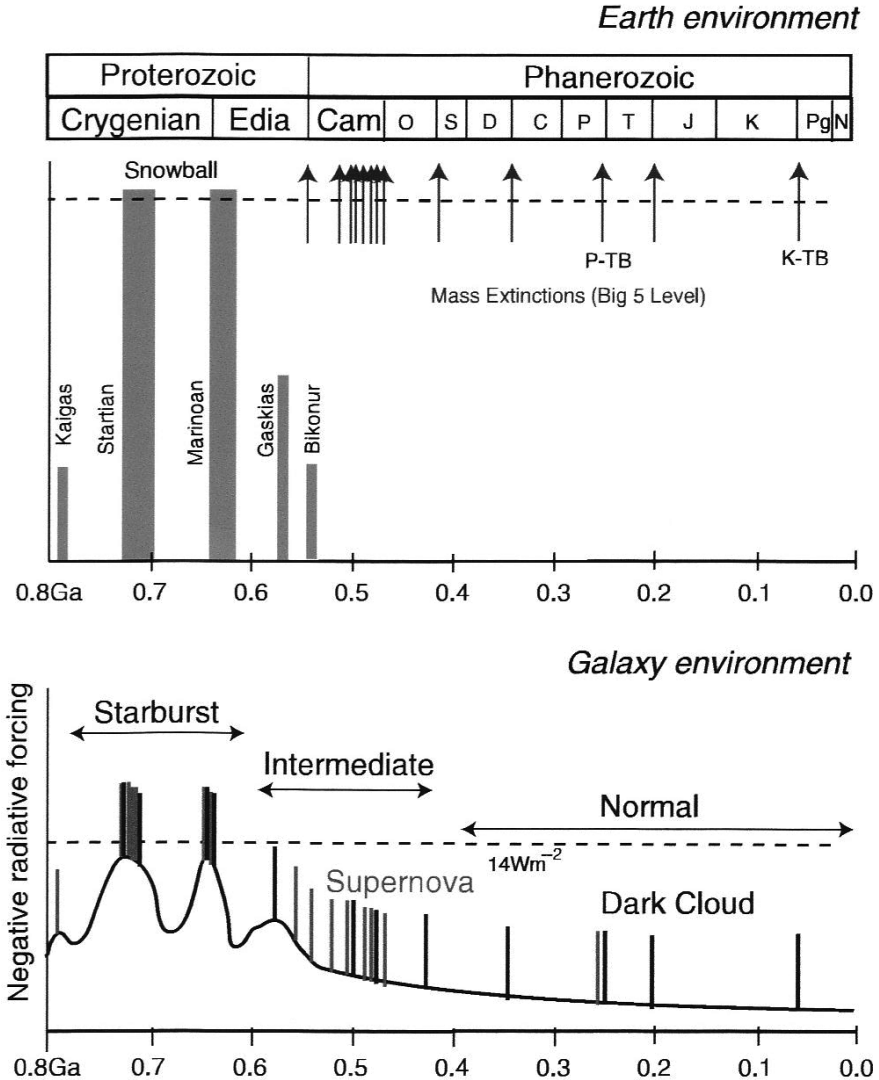
近年の地球の気候変動をもたらしした主要因と同様のメカニズムが、長大な地球史的時間におけるダイナミックな気候変動にも適用できるか否かは、慎重に判断しなければならないポイントである。

ところで、この仮説Bの説明様式は、個別事象をもうひとつの個別事象で説明する、という構図となっている。地球や宇宙の歴史の具体的細部が徐々に解明されつつある現在、この種の仮説は、歴史の因果連鎖、あるいは地球上での様々な応答反応に対す

る理解がより深まる学説、といえよう。

以上のように、上記のふたつの仮説ともに、スノーボール・アースの成立をめぐる要因論の考察において、近年の地球温暖化をめぐる要因論争の諸見解の影響を、多少なりとも受けていた仮説であった。とくに仮説Aは、当時一般社会にも普及した地球

図1 約7億年前から6億年前における、スターバーストとスノーボールとの相関関係
(注(7)の片岡論文、p.1160より)



温暖化の要因論を核心部分で継承している仮説であるため、まさに「流行」に左右された要因論であった、と言える。

§ 3. カンブリア爆発の地球史的要因とダーウィニズム

生物進化の歴史において、今からおよそ5億年前に、急速に動物が多様化・複雑化を遂げた時期があった。その爆発的進化を、「カンブリア爆発」あるいは「カンブリア紀の爆発」と言う。

地質年代区分において、5.4億年以降、2.5億年前までが、古生代である。その古生代の開始年代を境にして、地層から、肉眼で見える程度以上の大型の化石がよく見つかるようになる。また、硬い組織や殻を有する化石が多数産出されるようになる。

その古生代の最初の時代下位区分が、「カンブリア紀」である。問題の急速な爆発的進化は、その時代の中でも、5億2900万年前から5億1400万年前までの、およそ1500万年の間で起こったらしい。

現在の動物界は、分類の大きな区分である「門」の単位で、30～40程度の門に分類されるが（脊索動物門・棘皮動物門・節足動物門など。門の数は研究者たちの分類基準に応じて少々変わる）、そのうちの4分の3ほどの門が、カンブリア紀に出現したと判定されている。

更科功氏によると、カンブリア爆発は「現生の左右相称動物の多くの門が化石記録に突然出現したこと」⁽⁹⁾と定義されるのが一般的という。

つまり、現在地球上に棲息している動物の祖先たちの基本形、ボディープランが、その時期にほぼ出そろってしまったのである。ヒトデやエビやタコや昆虫や魚などの先祖形態が、地質年代的には極めて短期間に出現したのが、カンブリア紀の爆発的進化であった。

では、そのような生物の歴史上きわめて特異な事象が、なぜその時期に、どのようなメカニズムで、生じたのであろうか。その現象の引き金を引いたのは、何であったのか。その要因論に関しては、スノーボールの要因論と同様、諸説がある。

ここでは、次の有力なふたつの仮説を検討してみる。

- C. 動物食の捕食者の出現と目の誕生
- D. 陸地面積の急速な増大

2000年頃までの生物学では、カンブリア爆発の引き金を引いた主要因として、仮説Cの「動物食の捕食者の出現」⁽¹⁰⁾と「眼の誕生」⁽¹¹⁾が挙げられていた。

ほかの動物を捕食するようになると、肉食動物は、容易に十分な栄養を摂取することができ、生存や繁殖に有利になるであろう。また、その捕食行動の改善のために、感覚器官や運動能力も発達していくと期待される。

もう一方の、食われる側、被食者は、食べられてばかりいたら絶滅してしまうため、逃げたり防御したりする必要性が生じる。それゆえ、被食者もまた、感覚器官や運動能力に磨きをかけたり、固い骨格を身につけて容易には捕食されないように守りを固めたりしたのであろう。三葉虫が噛みつかれた化石も残っており、捕食者の出現の証拠は存在する。

つまり、軍拡競争、あるいは「共進化」が急速に進行していったであろう、と推測される。

その過程に伴って、外界の光を感知する器官、「眼」が出現した。ピントを合わせて周囲の状況を確認できるようになれば、捕食者側も、被食者側も、生存にとっても有利になるのは確実である。カンブリア紀の化石からレンズ眼をもつ動物がかなり見つかっている。

そして、視力の獲得により、食う・食われるの関係が激化し、身体を守る必要性が生じたため、カンブリア紀には硬い殻をまとった動物が多数出現した、と理解されている。

このように、20世紀までは、カンブリア紀の要因論の説明は、生存競争と自然選択、環境への適応、といった、「ダーウィニズム」の枠組内でなされるのが通例であった。

また、1990年代には、形態の多様化をもたらす遺伝子の多様化がいつ頃に起こっていたのか、というDNA解析に基づく探究も始まった⁽¹²⁾。そちらの研究も含めると、「ネオ・ダーウィニズム」の図式でカンブリア爆発を理解しようとするのが、研究者たちの基本姿勢であった、といえるであろう。

ところが、その説明様式は、2000年頃を境に変化が見られるようになる。

1990年代に、全地球史解説計画が始まったり、スノーボール・アース仮説が登場したりしたことを背景として、カンブリア爆発という特異的事象が、なぜ地球史のその特定の時期におこったのか、を説明する仮説が提起されるようになった。スノーボールから回復後の地球環境の諸様相、酸素濃度の上昇や、海水中のリン酸塩の増加などが注目された⁽¹³⁾。

その系統の仮説の中でも、とりわけ説得力があると思われるのが、仮説Dの「陸地面積の増大」説である。

「最も重要な事象は、地球表層の海水がマントルへ移動して、海水準が約数千万年という短期間に約600m下がり、巨大陸地が出現したということです。このイベントが、

カンブリア紀の生命進化の出発原因です」⁽¹⁴⁾

上記のように、丸山茂徳氏は断言している。この仮説Dの概略は以下の通りである。

6億年前頃に、陸地面積が急速に増大した。証拠としては、当時の大陸の海水準の急激な低下や、堆積岩の急速な形成を示すデータがある。原生代初期には現在の2割程度であった陸地面積が、6億年前頃には現在の8割程度の面積になったということである。

その結果、陸上の河川を通じての栄養塩類の供給量が増加する。また海が浅くなり、大陸棚に太陽光が届くようになる。その養分と太陽光を利用して、光合成植物と動物が多様化・大型化・複雑化を遂げていった——という筋書きである。

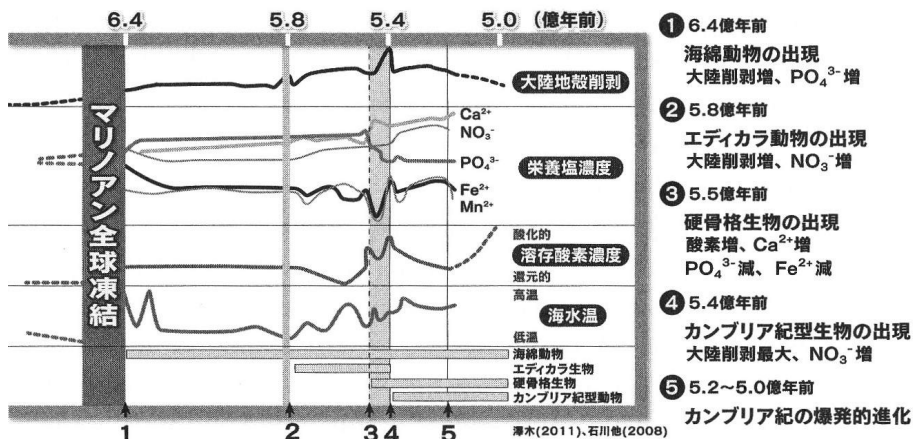
この仮説Dには、当時の海岸線に記録された海水準の低下が、なぜ原生代末のその時期におこったのかを説明する「水漏れ地球説」⁽¹⁵⁾が伴っている。そのため、仮説全体として、地球の歴史における様々な応答の必然的結果として、カンブリア爆発が位置づけられる。

このように、2000年代以降、カンブリア爆発に対する説明図式に変革が生じたのである。

かつては、生物学の範囲内、あるいはダーウィン流の説明枠組内での考察にとどまっていたのだが、近年ではそれに加えて、当時の地球表層や地球内部の変動と結び付けて、その特異的事象を理解していこうとする視点が普及してきた。

カンブリア爆発の要因論に関する説明図式に、「パラダイムの変革」が訪れた、と表現しても言い過ぎではなかろう。

図2 カンブリア爆発の諸段階（注⁽¹⁴⁾の丸山の著作、p.59より）



以前は、なぜ「急速に」進化が達成されたのかが議論の焦点であった。それに加えて今日では、なぜ「その特定の時期に」起こったのか、を問題にするようになったのである。

したがって、この枠組の変化は、「転換」ではなく、「拡大」あるいは「補充」といった意味合いの変動であったとみなせる。新たな視点が付け加わり、より包括的に、カンブリア爆発を理解できるようになってきたのではなかろうか。

よって、どちらの説明が正しく、どちらかが誤り、というような事柄ではなく、両者の説明図式は相補的と捉えればよい、と筆者は考える。

そして、仮説Cのような旧来の説明様式を振り返ってみると、やはり、進化的事象を「ダーウィニズム」の枠組内で説明すべき、という暗黙の了解事項に縛られていた、と思われる。20世紀を通じて支配的であった、ダーウィン流、またはネオ・ダーウィニズムの進化論のパラダイムが、いかに強固であるかを認識させられる。

§ 4. 要因論の類型

ここまで、地球と生命の歴史における、ふたつの特異事象に関する4種の要因論を検討してきた。それらは、異なる2種の類型に分けられる、と筆者は考える。ひとつは、仮説Aと仮説C（タイプⅠとする）、もうひとつは、仮説Bと仮説D（タイプⅡとする）である。

タイプⅠの、仮説Aと仮説Cにみられる類似点は、どちらも「既存の説明図式に落とし込むことによって、その特異事象の要因が理解された」という思考パターンに根差している点である。

仮説Aの論者は、異常な気温低下を説明するために、「二酸化炭素濃度の変動が地球の気温動向を決定的に左右する」という図式に乗せようとしていた。そして、その図式に収まった段階で、ひとつの理解が得られる、と暗黙のうちに了解していたようである。

同様に仮説Cにおいては、急速な動物の進化を説明するために、「環境の変化に伴う生存競争と自然選択、さらにその形質の変化をもたらす遺伝子の突然変異」という図式に乗せようとしていた。そして、その図式で説明可能であれば、適切な要因論であるとみなしていたようである。

このように、その時代に流通している説明図式に乗せることができれば、物事が理解されたことになる、との思考パターンが共有されていたのである。これは、人間が特殊な出来事を納得できる形で了解するための、ひとつの技法なのであろう。

ただし、自然科学においては、流通している一般的な説明図式が揺らいだり、破綻

してしまったりすることがしばしばある。

「二酸化炭素濃度の変動が地球の気温動向を決定的に左右する」というCO₂主原因説の大前提は、21世紀において批判にさらされている。また、「環境の変化に伴う生存競争と自然選択、さらにその形質の変化をもたらす遺伝子の突然変異」というネオ・ダーウィニズムの図式に対しても、21世紀においては様々な批判がなされている⁽¹⁶⁾。

その意味で、タイプⅠのふたつの仮説は、当時支配的であったが今日では揺らいでいる説明図式に落とし込んで、理解を得ようとしていた要因論であった、といえる。

もう一方のタイプⅡの、残り2種の仮説にみられる類似点は、「あるひとつの特異事象を、それに先行する、またはほぼ並行して進行するそれ以外の特異事象からの因果連鎖によって説明できれば、その特異事象の要因が理解された」という思考パターンに根差している点である。

仮説Bでは、異常な気温低下の引き金を引いた主要因として、宇宙規模での特異事象、スターバーストと銀河宇宙線の増大に注目した。

同様に仮説Dにおいては、急速な動物の進化がなぜその時期に起こったのかを主要課題として、栄養分と光合成の条件を満たすことになる、陸地面積の急増に着目した。

これらの仮説構築の背後には、「地球の地質学的歴史や生物進化の歴史においては、様々な複相的な相互作用、因果連鎖があり、その結果、しばしば特異な事象が生成してくる」といった世界観がある。

そのような世界観は、とりわけ1990年代以降に、急速に自然科学者の間に浸透してきたようである。そのことは、地球科学や生命科学の領野で、具体的な過去の歴史の諸様相が詳らかになってきたことと、無関係ではないであろう。

したがって、タイプⅡの2種の仮説は、21世紀に普及しつつある、宇宙・地球・生命の相互応答的な世界観に乗せて、理解を得ようとしていた要因論であった、といえる。

§ 5. まとめと考察

前節まで検討してきたように、地球と生命の歴史におけるふたつの顕著な特異事象、スノーボールとカンブリア爆発に対する要因論には、諸説がある。そして、両者に対する要因論はともに、1990年代あるいは20世紀型のタイプⅠから、21世紀型のタイプⅡへと変遷を遂げてきた。

ただし、主流であったタイプⅠの要因論は、21世紀には批判され、揺らぎつつあるものの、主要因のひとつの選択肢としては継承されている。また、タイプⅡの要因論は、必ずしもタイプⅠを否定するものではなく、異なる視点・異なる思考枠組から、

タイプⅠを補充・拡大する意義があったといえる。そのため、より包括的な理解の道が開けたのではないだろうか。

タイプⅠでは、その時代の「既存の説明図式に落とし込むことによって、その特異事象の要因を理解しよう」とする思考枠組に拠っていた。これは、言い換えれば、その分野のパラダイムに乗せることによって、個別事象の意味を了解しようとする戦略である。

もう一方のタイプⅡでは、「あるひとつの特異事象を、それに先行する、またはほぼ並行して進行するそれ以外の特異事象からの因果連鎖によって説明することにより、その特異事象の要因を理解しよう」とする思考枠組に拠っていた。そして、こちらの思考枠組の背後には、21世紀に地球科学や生命科学の領野に浸透してきた、宇宙・地球・生命の相互応答的な世界観があった。よって、こちらの指向性を換言すれば、今日の世界観に乗せることによって、個別事象の意味を了解しようとする戦略といえる。

したがって、タイプⅠ・タイプⅡの要因論のいずれも、鳥瞰的な視座から見れば、“流行”に左右されている議論である、と見做せよう。自然科学の学説といえども、時代の影響から免れるわけにはいかないのである。

ところで、今から何億年も前に生起した、全地球規模で千万年単位で継続した特殊事象が、なぜ、どのようにして、何を引き金にして起こったのか、を包括的に理解するのは、実際には容易なことではない。

そもそも、長期的な地球の気候変動には、多種多様な要因が複雑に関与していると考えられる。大陸の成長、長期的な異常火山活動、大陸移動とそれに起因する海流の変化、生物の活動による大気組成の変化、太陽活動の変化、宇宙線量の増減、ミランコビッチ・サイクル、小惑星の衝突による環境激変の影響など、挙げればきりが無い。

また、大規模な生物の多様化・複雑化の背景にも、さまざまな要因が複雑に関与していると考えられる。遺伝子の突然変異の蓄積、大陸の分裂による生物群の隔離、環境変化に伴う生存競争と自然選択、特殊な器官の出現に対する生物の応答、急激な寒冷化や温暖化への適応、大気組成の変化、海水中の栄養成分の変化、海水準の変動に伴う植物の受光量の変化など、多様な可能性が考えられる。

現実には、ひとつの突出した要因のみで、スノーボールが形成されたり、カンブリア爆発が進行したりしたわけではなかったかもしれない。むしろ、両者の事象とも、多様な要因が、数年から数千年、数万年から数百万年単位の異なる時間スケールで、複相的に作用して進行していった、と想像するのが自然である。

しかしながら、そうした事態を納得できる形で理解しようとする、と、わかりやすいシンプルな図式に乗せる、という手段に訴えざるを得なくなる。

その結果、タイプⅠのようにその時代の主流の説明図式に落とし込んだり、タイプⅡのようにその時代の主流の世界観と折り合うような説明をしったりするパターンが常套手段となったのではないだろうか。

結局、人間がなんらかの特殊な出来事を理解する、というのは、既存のわかりやすい説明パターンに乗せることによって、納得感を得る、ということなのではないか。一言でいえば、「類比による理解」である。

それはひょっとしたら、初期のホモ・サピエンスが自然界と共存していた頃からの、最も基礎的な理解の様式なのかもしれない。その様式を、現代の自然科学でも変容した形で継承しているのかもしれない。

自然科学では、我々を取り巻く世界を「客観的・中立的」に把握しようと試みている。ところが、その理解の仕方には、暗黙のうちに何重にも、さまざまな前提や束縛が絡んでいるのである。そのような“思考慣性”の関与を冷静に受け止めて、自然科学の諸学説の一見客観・中立的な主張に対しても、適度な距離感をもって、批判的精神を忘れずに、接していきたいものである。

注

- (1) J.L.Kirschvink, “Late Proterozoic Low-Latitude Global Glaciation: The Snowball Earth”, in J.W.Schopf ed., *The Proterozoic Biosphere —A Multidisciplinary Study* (Cambridge,199), pp.51-52.
- (2) 川上紳一『全地球凍結』（集英社新書、2003年）、第1章。
- (3) P.F.Hoffman & D.P.Schrag, “The Snowball Earth Hypothesis: Testing the Limits of Global Change”, *Terra Nova*, 14 (2002): 129-155.
川上、前掲書、第5章3節。
田近英一『凍った地球』（新潮社、2009年）、pp.125-131。
- (4) 氷期と間氷期における CO₂の変動と地球の気候変動との間の相関についても、20世紀の温暖化に関しても、気温の変化が先で、CO₂の変化は後から追隨して起こっている、との信頼できる以下の研究がある。

H. Fischer, et al., “Ice Core Records of Atmospheric CO₂ around the Last Three Glacial Terminations”, *Science* 283(1999): 1712-1714.

近藤邦明『温暖化は憂うべきことだろうか』（不知火書房、2006年）pp.70-76。

理論的考察としては、地球の気温も海水温も上がると、海水中の CO₂溶解度が低下し、大気中に放出され、大気中の CO₂濃度が結果的に上昇する、という因果連鎖が提起されている。

そのため、大規模な地球史的気候変動が二酸化炭素濃度の変動によって引き起こされた、との考え方は、説得力に乏しい。

また、温室効果に関しての「気候感度」の値が、研究者によって大きくばらついてい

ることも、CO₂主原因説の信頼性を下げている。次の著作を参照。

深井有『地球はもう温暖化していない—科学と政治の大転換へ—』（平凡社、2015年）、p.137。

- (5) あるいは、研究費獲得などの目的から、あえて理論的瑕疵には目をつぶって、CO₂主原因説を受容していたのかもしれない。
- (6) N. スペンスマルク、青山洋訳『不機嫌な太陽』（恒星社厚生閣、2010年）、原著は2007年。桜井邦朋『移り気な太陽』（恒星社厚生閣、2010年）。
- (7) スペンスマルク、前掲書、pp.136-139。

R.Kataoka, et al., “The Nebula Winter: The United View of the Snowball Earth, Mass Extinctions, and Explosive Evolution in the Late Neoproterozoic and Cambrian Periods”, *Gondwana Research* 25(2014): 1153-1163.

- (8) 逆に、およそ20億年前から10億年前の長期間にわたって、氷河形成が起こったことは全く知られておらず、その期間は、星の生成率が顕著に低かった時期と一致している、とシャヴィヴによって指摘されている。

N.J.Shaviv, “The Spiral Structure of the Milky Way, Cosmic Rays, and Ice Age Epochs on Earth”, *New Astronomy* 8 (2003): 39-77.

- (9) 更科功『絵でわかるカンブリア爆発』（講談社、2016年）、p.8。
- (10) S.C. モリス、松井孝典監訳『カンブリア紀の怪物たち—進化はなぜ大爆発したか—』（講談社、1997年）、pp.207-212。原著は1997年。
- (11) A. パーカー、渡辺政隆・今西康子訳『眼の誕生—カンブリア紀大進化の謎を解く—』（草思社、2006年）、原著は2003年。

- (12) 宮田隆『DNAからみた生物の爆発的進化』（岩波書店、1998年）。

- (13) 例えば、次の著作では、リン酸塩の濃度上昇と硬組織の出現との関係を議論している。

宇佐見義之『カンブリア爆発の謎』（技術評論社、2008年）、pp.90-92。

- (14) 丸山茂徳『地球史を読み解く』（NHK 出版、2016年）、p.155。

- (15) S.Maruyama, et al., “Initiation of Leaking Earth: An Ultimate Trigger of the Cambrian Explosion”, *Gondwana Research* 25(2014): 910-944.

※水漏れ地球（Leaking Earth）説：

太古代以来、億年単位の時間スケールで、地球内部が極めてゆっくりと冷却されてきた。海溝付近のマントルもそれに伴い冷却し、6億年ほど前に、ある臨界温度まで下がる。それ以降、プレート中の水分が、含水鉱物として、海溝を通してマントルへと移動を始める。それに伴い、プレート上部の海水量が減り、海水準が低下する。その結果、陸地面積が増大する、という因果連鎖の仮説である。

- (16) 例えば、次のワグナーや、池田清彦氏の著作を参照。

A.Wagner, *The Origins of Evolutionary Innovations: A Theory of Transformative Change in Living Systems* (Oxford, 2011).

池田清彦『「進化論」を書き換える』（新潮社、2011年）。

図3 水漏れ地球説の模式図（丸山、前掲書、p.162より）

