

科学の進歩と未来[‡]

名古屋大学 遺伝子実験施設

伊藤 繁^{*}

光合成研究の未来を、科学研究の発展段階についての考え方と、光合成研究の歴史への感想、研究と科学者個人の関係から論じる。

1. 科学の発展段階

「伊藤君、光合成の進化とか言っているなら、行って自分で見てきたまえ。」と熊沢さんにいわれて、私は太古のシアノバクテリアの堆積物（20億年前のストロマトライト化石）を調べに、1998年夏カナダ北極圏のオーロラで有名な人口1万人の町イエローナイフへと飛び、そこからチャーター飛行艇で100 km、グレートスレーブ湖中の島につきました。北極圏の夏は最高、ヒトのいない熊のテリトリー（本当に熊さんに遭遇）にテントをはり、見渡す限り続くストロマトライト上で、呆然（図1）。昼はボートで別の島に行き何万年間堆積した化石を切り取る。夜は、ボートで大きなマスやパイクを釣り、大部分はリリースし、オーロラ（イエローナイフはオーロラ見物で有名）を見る。ストロマトライトの一部は今私の足の下にある。地球物理の熊沢峰男さん（当時名大理）、川上紳



初日は全員無言でただ化石をみつめていた。

図1 20億年前のシアノバクテリア堆積物（ストロマトライト）化石探索。カナダイエローナイフのグレートスレーブ湖（伊藤撮影）

一さん（岐阜大）、地質学の磯崎さん（東大）らは、広い視点から地球史を考える科研特定領域研究「全地球史解読」を立ち上げ、分野内での縦縞研究だけでなく、広い視点からのヨコシマな「シマシマ学・科学運動」を目指していました。

一方私は「光合成反応中心」を研究するうちに、「こんな完璧なものがどうして出来たのか？」と「進化」に興味をもち、たまたま（加藤哲也さんの紹介で）研究班に入れてもらった所でした。でも、「無知な私が化石調査にいいのですか？」「君でも、困った学生さんを助けるくらい出来るでしょう」といわれ、途中で飛び入りしました。「見渡す限りのストロマトライト」、「多細胞生物がはびこる前の、捕食者のいない世界」は「細菌ワールド」、シアノバクテリアが延々と何万年にもわたって堆積した時代だったのです。「すごい、きてよかった。」「光合成が地球を変えた」。

それまで、レーザで光合成を研究していた私は「君のやっているのは生物ではない」「役に立つのですか？」といわれ、生物分野の大型研究にはお呼びでなく、疲れてもいました。

化石探索に出かける前、熊沢さんが若手地球物理学者たちに話しました。科学の発展には段階がある。科学研究は、段階を追って進む（図2）。

①「狂いと天才の時代」；だれも思いつかない事、全く新しい概念を提出する天才は気狂い扱いされる。時には火あぶりにあう（それでも太陽はまわっている）。誰も信じてくれない。

②「ロマンスの時代」；やがて少しはわかってもらえる。そうかも知れない。科学研究の対象になる。研

[‡] 解説特集「30年後の光合成研究」

^{*} 連絡先 E-mail: Itoh2nd@gmail.com



図2 科学の発展段階

究者も増える。

③「科学の時代」；学説が市民権を得て、科学として定説となる。正統が出来る。するとこれに合わないものは異端となり、子殺し（＝異説、違う考えの排除）が始まる。

④「ビジネスの時代」；やがて実際に使われ、お金を生み出すビジネスへと発展する。ビジネスとしての科学が始まる。でもこれも悪くはない。きれいな研究所が出来て、役に立つ、お金がもうかる。

熊沢さんのオリジナルか、受け売りかは、聞いていませんが、これを聞きながら、私は何かがあったような気がしました。私はそれまで「ビジネスのように研究をする」ことを嫌っていました。でも、農学や工学ではこれ④が大事、しかし理学では③科学が大事。同じ分野にいても私の先生たちは③科学や④ビジネスが強く、私は②ロマンスや③科学が好き、①に憧れている。私は、一人の研究者の中にもこれらの要素が混じっていると気がつきました。それぞれの研究者はこれらの比がちがいが、違うスペクトルをもって研究を進めている。そんな風に考えて周りを見ると、「工学部の先生でも自分の給料分を稼げる人はほとんどいない！」、役に立っているわけでもない。私は、「理学だからここで終わり！」などと言わないで、どこまでも応用も含めて、考えてみたらどうだろうか？自分の出来る事には限界はあるが、考えには限界をつくらないでいいのではないかと考えつきました。

実は研究費を使うという事自体が「ビジネス」なのです。だって、ダーウィンさんやダビンチさんやメンデルさん達の時代には、研究分野も、専門も未分化で、科学も職業とはいえなかったようです。近代になり、給料もらって研究する「職業的学者」が

生まれました。自分は「職業」として、「もらったお金の研究をしている！」ようでもあります。では、これらのスペクトルを意識的にとらえ、自分の研究やテーマも考えたらどうだろう。自分の研究全体を職業的研究ゲームと考え、①-④のゲームを自分の好みに合わせて、適宜配分する。ビジネスゲームや、科学ゲームを意識してやる。自分の専門として期待されていることは100%やり、そして、すこし、給料分からはみだしても、自分自身や、みんなのための科学も、別にやってもいいような気がしてきました。これが化石堀りに行く自分について考えた事でした。

2.30年前：「見えない物をみる人との出会い」

さて、未来のことは誰にもわからない。それが良いともいえますね。でも30年後くらいといわれれば、考えられなくもないかもしれませんね。40年前、光合成の研究では「反応中心」という概念が生まれ、探索が始まりました。しかしタンパク質の構造はミオグロビン(1958年)くらいしかなく、膜タンパク質は膜表面についていると考えられていました。その中で1966年P. Mitchellさんが光合成や呼吸系のタンパク質は膜を貫いて方向をもって、並んでいる。その中を電子やH⁺イオンが一定方向に動き、膜内外溶液層間にΔpHと膜電位差を作り出す。そして、これが膜上の別部分にあるATP合成酵素の中でH⁺を動かし、ATPを作るエネルギーを与えるという「膜浸透圧説」を主張しました。彼はpHメータと酸素電極で、細胞やミトコンドリア膜の外側の変化を見ただけなのに、膜中を横切って電流が流れ、H⁺イオンが動く、予言しました。

「見えない物をみる」この提言は、溶液中での酵素反応しか知らない当時の大先生たちの大きな反対にさらされました。でも、今になってみれば、当たり前！細胞内外での物質や、イオン、電子の動きはお互いに関係し合い、生物そのものを生み出した原理でもある。しかし、私も習った当時の先生方は「P. Mitchellは気狂いだ、間違っている」と大合唱でした。その中で、私の英国でのポストドク時代の先生Croftsさんを含む多くの若手が、この説で自分の目の前の生物現象がうまく説明されることを理解して、「実際に見てみよう」と、膜中の分子やイオンや、電子の動きを見る為の技術を発展させました。この時代に英国でお会いしたMitchellさんは恐ろしいくらいに、戦っていました。そして、膜タンパク質としては初めて決定された

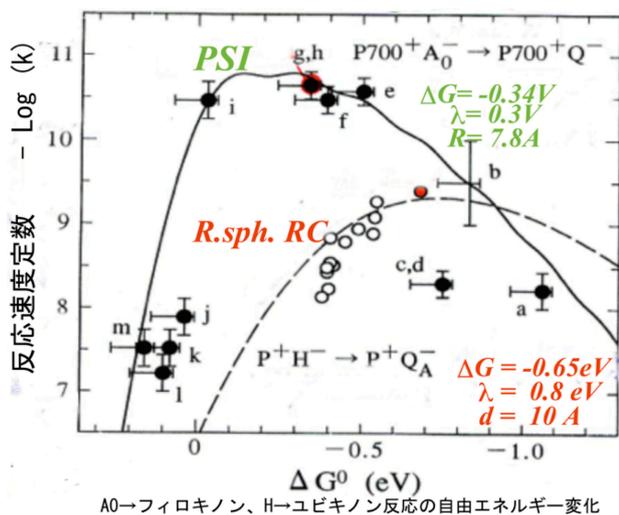


図3 光化学系IのA₀→フィロキノン、紅色光合成細菌*Rb. sphaeroides*反応中心でのフェオフィチン→ユビキノン反応で、キノンを抽出後、酸化還元電位の異なる人工キノンと入れ替えることで反応の-ΔG⁰を変えた際の、反応速度定数kの変化。2つの反応中心は異なった-ΔG⁰とλで本来のキノン（赤丸）に最適化されていた²⁾より改変

「紅色細菌反応中心の構造 (1984)」²⁾が「化学浸透圧説」を実像にしました。その後、さらに多くの実験がATPaseの構造や一分子の動きまでを見せてくれました。反応中心の構造は見事にそれまでの分光実験や生化学実験を説明し、このタンパク質内にほぼ対称に配置されたクロロフィルやキノンの位置関係は美しくさえありました。

反応中心構造の話ドイツから帰られた三木邦夫さん(京大)に光合成研究会の公開講演会(今の年会の始まり)で初めて聞いたとき(1985年)、最後まで聞くのには勇気がいりました。「自分の知りたかったことが全部そこにある、しかし、自分の研究は何もそれに貢献していない」。何度聞いても発見があり、勇気がいりました。やがて、「なんでこんな構造が出来たのだろう」と考えるようになりました。構造はそのままでは、「絵に描いた餅」でしかない。しかし、その中に自分の知りたいことが隠れている。

やがて自分のやっている、まだ構造未解明の光化学系I反応中心も、似た構造をもつにもかかわらず、異なった出力を生み出すように内部の電子移動反応系が最適化されていることが、レーザ実験からわかり出しました(1996)³⁾。PSI反応中心内の電子受容体フィロキノンの役割を初めて決め、さらに人工分子と取り替えて、超高速ピコ秒の電子移動反応やESRへの影響を見ることで、これわかりました。フィロキノンを人工

キノンに入れ替えても反応は進み、電子の移動速度はMarcusの電子移動理論がいうように、反応で生まれる自由エネルギー差(-ΔG⁰)が、分子配置や構造の再配置に必要なエネルギー(λ)と釣りあう(-ΔG⁰=λ)時に、トンネル効果で最速で進み、これ以下でも以上でも遅くなることがわかりました。この時点では構造未解明でしたが、キノン入れ替え実験から分子間距離と自由エネルギー差を図3に示すように予測しました。そして、その後解明されたPSIの構造はこれを実証しました。2種の反応中心は、作り出す還元力も、使うクロロフィルも、吸収する光の波長も大きく違うが、どちらも高度に最適化されていることがわかった。自然は高度に最適化されているが、変化も許し異なった反応中心を作り出した。改めて「どのようにしてこんな構造ができてきたのだろう」と考え、「進化」を知りたくなりました。

3. 科学研究の進め方「新しい概念、対象、技術、需要」

熊沢さんの受け売りに戻ります。科学研究で一番大事なのは、「a. 新しい概念」である。科学者はこれを夢見る。しかし、新しい概念は「①気狂いと天才」のもの!

実際の研究は、「a. 新概念」、「b. 新対象」、「c. 新技術」、そして「d. 新需要」で推進される(図4)。凡人研究者は、「a. 新概念」を夢見つつ、実際にはb-dを進めて「論文」をだし、「研究ビジネス」をする。先にあげたP. Mitchellさんの新概念も、当時の新技術(電子顕微鏡、遠心分離、反応測定などの進歩など)による細胞や膜構造観察の革新の上に出てきました。私はbとcが好きで、新しい対象(新色素Chl d, Chl f,



図4 科学研究の進め方

Zn-BChl *a*などをもつ光合成系、絶対嫌気の光合成系等)に、(超高速レーザ分光や、極低温ESR、顕微分光などの)新装置を使いながら、自分の自然観察能力をひろげ、さらに共同研究で視野を大きく広げることが出来ました。さらに時代の変化で、新しいneedsである「人工光合成」が社会から出てきました。私もたまたまこの課題でトヨタ自動車との共同研究(2006-2010)を行っており、ビジネスとしての研究の機会ができました。私のそれまでやっていた「学者間科学ゲーム」と違う「会社科学ゲーム」は、ともに、いいゲームではあるのですが、部分的であることも否めません。会社ゲーム中では評価されないことも、価値観を切り替えると科学ゲームとしては価値があり、楽しいゲームに出きる事を「学生諸君」が教えてくれました。

4. マルチリンガルな研究者：「君は生物ではない→君は生物です！」

私は生物系から名大理・物理学科の教授(2000-2010)になりました。いい体験をしました。物理学科は生物物理が4研究室、残り16研究室は素粒子・物性・宇宙物理。トランプゲームに例えれば、一緒になった時は物理学科ゲームをやり、個々の研究分野ではババ抜きやったり、七並べやったりしているような感じです。この中では、他のグループの人たちが自分達のことをわかってくれないとこぼしても仕方がない。評価も価値観もちがう。「生物の人はどう思いますか」と「宇宙の人」に聞かれ、50名連名の論文が博士論文として出てきます。理論物理などに比べれば私の研究は役に立つ、でも底深い面白さではとてもかなわない。一方、こちらのやっている別のゲームの相手の超巨大会社は、純粋理論のような営利につながらないゲームはどう転んでもやらないし、やれない。大学とはとても豊かな、お金だけでは決まらない贅沢な組織だと実感しました。皆がそれぞれ自分のゲームを自分の価値観でやっている。

研究費も、物理系、化学系、生物系、皆さんそれぞれ違うゲームをやっている、そこでは、とりあえずそのゲームをしないとイケない。いっしょに遊ぶには、相手の言葉もわかったほうが面白い。マルチリンガルになると楽しいのがこの研究ゲームだと思うと、楽しんで。相手を尊重し、科学を楽しむ。外国語を話せるほうが話せないより楽しみが多いように、分野もマルチはいい。

ただし、ゲーム等といわずに「気狂いと天才の時代」をひたすら脇目もふらずに、生きるのもいい科学者ゲームですね。一方、科学は我々のすべてではない。我々の職業もまた、自分の科学の全てではない。

長い間、自分が生物分野にいた間は「君の研究は生物ではない」といわれました、しかし物理分野にきたら「生物」のことを何でも知っていると思われました。実際は小さなゲームしかやらないのが自分ですね。

5. 未来の技術、対象、概念

ゲノム、分子構造、解析技術、遺伝子操作、シミュレーション。いろいろな新技術がありますね。物理と生物の研究のもっとも大きな違いは、理論家の存在の有無でした。物理では、実験と理論が両輪となって研究を進めます。先端技術での実験がデータを出し、それを理論が検証し理解を深め、さらなる実験技術の提案や予測もする。それを新たな実験が実証、反証し、さらに理論がこれに対応する。一方、我々の生物研究ではまだ、自分で思いつき、実験をして、自分で解析して、運がよければ、思い通りの結果がでる。運が悪いと。。。実験の前にsimulationなどはしない。でもこれだけ情報が多くなると、一つの研究課題も一人の研究者の能力をこえていて、否応無しに共同研究が必要となります。理論が必要なのでしょう。でも物理学者の作った理論は一般論が多く、生物個別の現象にはなかなか対応しきれない。今後の生物学では研究者個々のゲームをこえた共通ゲームを意識して、理論と実験の協力できる研究体制を作る必要がありますね。その為には、すでに現在進みつつあるような、若手同士の共同研究や、中堅学者間の協力関係がますます重要になってくるでしょう。一つの言葉、分野だけのゲームだけでなく、マルチリンガルな展開が必要です。

実は、全く新しい概念はめずらしく、すでに感じていた疑問、皆が疑問におもっていた当たり前のことの中に、新しい展開がありそうです。組み合わせを変えると、新しい解決法がみえてくる。見えないものが見えてくる。

6. 職業としての研究と自分の科学

私はいつの間にか、論文を書ける、学生さんが解く事が出来る、研究費をもらえる、といったうまいいきそうな研究テーマを選ぶのがうまくなりました。で

も、頭の中のどこかが、「ムズムズ」。「私はこんなことを本当にしたかったのだろうか？」。

そんなときに、「化石掘りにいって進化を見てきたまえ」といわれ、役に立たない生物物理学者が地質・地球物理の集団に加わりました。でも、たしかに「見ると聞くとは大違い」。真核生物がいなかった地球を実感することができました。これは簡単には、論文にはできない。(できればすばらしい!)。しかし、この集団中の最若の院生よりも物を知らないフル人間にも、価値があることを実感しました。私にとっては、「かれら地球物理学者の常識」は常識ではない。いつも基本を聞かざるをえません。私の存在はグループ内にほどほどの余裕と軽い緊張を与えたようです。私に説明することで、全員が課題を再確認し、優越感も得て和む。私は私として、自分がレーザ実験で標的としてきた、ガラス容器内の光合成反応中心タンパク質が生まれた環境を初めて実感しました。これがあって、現在がある、生物間の生存競争を超えた大きな地球環境の変化の中で、シアノバクテリアは太陽光と切り結び、物理法則を自在に利用して光合成装置を完成してきた。私は、もっと早く、これを見て、感じておけばよかったのに。いつもとりやすい研究費におおきり、金にならない研究はしなかった。自腹でストロマトライトを見にきててもよかったのに。結局、やれる範囲の仕事として、科学をやっていた。(見事に熊沢流、「科学運動」に巻き込まれました!)

地質学研究的の昔話を大自然の中のテントで毎晩聞きました。プレートテクニクスを異端視し、自腹での研究が当たり前で、おらが裏山を縄張りにするかつての地質学の話は、それなりに身につまされるものでした。

7. ビジネスとビジネスでない科学

たしかに私がやってきた研究は、立派な仕事。年に10近い論文も出る。でも、何か「ムズムズ」。他のこともやりたい。で、わかってきました。趣味でもいいから、自分の好きな科学もやればいい。自分の専門ゲームは仕事としてしっかりやる。そして、他にもやればいい。そんな気分になりかけているときに、2005年愛知万博への協力依頼がありました。地球のどこかで植物を採り、生かしたまま運び、展示したい。昔コーヒーの苗を大陸を超えて運んだように。そこで、企画に参加。偉い人たちは皆さん色々アイデア出すけ

ど、動かない。結局、私たちが2004年夏にアラスカ最北端ポイントバローにいき、大阪の「此花さくや館」と高知の「牧野植物園」の採集チームといっしょに採集と実験をする事になりました。私たちは本来は実験室内だけの科学者で、寒冷生物の専門家は他に沢山いらっしやるので、論文とかは無理そう。だけど、行くことにしました。

夏の極地は、やはり最高。森林限界をこえた大陸最北端には、冬期の積雪20 cmに埋まって冬の寒気をやりすごせる、たけの低い植物だけしかいませんでした。しかし、草本、木本、コケ、地衣と沢山の種が地をはい、堆積し、その上にまた生えて短い夏に成長する。どうも植物や光合成は大きな適応能力と隠れた力を持つらしい。夏とはいえ、強い日差しの下で雪が舞う。冷害の条件そのものの極地で、植物達は花さえつけない。日本に帰ってから、だんだんとわかってきました。極地のコケや地衣類は光合成がほとんど働かない低温でも、強光、紫外線をうける。でも死なない。十年後の今、私は一生懸命乾燥下でのコケや地衣類の光障害回避機構をピコ秒蛍光寿命測定で研究しています。お地蔵さんや樹幹についた地衣類は、いつもは乾いていて、霧や雨でぬれた時だけ、光合成する。乾いていて反応が出来ない状態で、光が当たっても死なない。物質生産にも関係ない生物である地衣類やコケの光合成は、ビジネスにはなりそうにもない。でも高等植物では機動的に光障害回避に働くNPQ機構やステートシフト機構などと似た現象を、低温でさらに強力にやっているのが興味深い。というわけで、今は、無給で、この課題をピコ秒蛍光寿命の測定をしながら調べています。新しいことはおもしろい。

8. 人工光合成ビジネス

今現在は、好きな研究と、物理・化学系のJST若手さきかけ研究光関連の2テーマや、科研人工光合成研究のアドバイザーとしてお手伝いしています。これは仕事。世の中では、人工光合成や、藻類による油の生産など、エネルギーがらみの大きな研究費がいくつも進んでおり、光合成研究者も大勢はいつています。工学や化学の先生たちは、しっかりと協力して運動し、次の大きな研究課題を作られます。必要とあれば、生物光合成も多数いれて研究ビジネスをこなす。すごいですね。研究費をとるのはビジネスと割り切って、考え、やりたいことをやる。悪くない。科学もますます

ビジネスになってきた。で、あなたのスペクトルはいかがでしょうか？①気狂いと天才？それとも、②ロマンス？③科学でしょうか？あるいはやはり④ビジネス？

9. 30年後はどうなるの？

そして、30年後にはどうしているのでしょうか？この40年、私にとっては光合成研究は予想を超えるドラマでした。昔は想像しなかったことがいっぱい実現しました。何よりも技術の発展がすばらしい。でも、同時にそんなに変わったことも起こっていないともいえない。精一杯、背伸びして、跳んでみても、まじめな自分は決して跳べないから、安心といえれば安心。自然はみな繋がっていて、どこからやろうと、大丈夫！一生懸命考えれば、いつの間にか、希望はかなえられている。世界中で、手をつないで進めているのが研究ゲームですから。

でも、こうやって書いてみると、私は「①気狂いと天才ゲーム」は全くやらなかったようです。皆さんはがんばってみるのもいいかもしれませんね。まだ十分時間もある。温暖化で世界も今の延長ではなくなっていくかもしれないし。

「光合成」は偉大です。私たちは小さくとも、この地球さえ変えた偉大な生物機能は、すばらしい研究課題を我々に与えつづけてくれるでしょう。

熊沢；ヨコシマなことをやりましょう。 シマシマを見よう！

伊藤；ありがとうございます。おかげで、みたかった太古の化石も、北極圏の生物も、実際に、行って、みて、考えました。

専門はゲームの一つ、やりたいゲームがいっぱい。

精一杯イメージーションを膨らませて、現実は想像を超えて進む。

ビジネスもロマンスもやりたい。自分の生活の中にも科学がある。

自然はつながっている。安心して縦横も横縦もできる。

物理も化学も生物も生活も理論も実験も、つながっている。

この惑星の上で、進化する生き物たちともつながっている！

ビジネスを100%軽くやり、後30%はヨコシマも。

生活も家庭も、地球環境も、友達も皆大事！

図5 未来

Received December 2, 2013, Accepted December 2, 2013,
Published December 31, 2013

参考文献

1. Mitchell, P. (1966) Cherniosrnotic coupling in oxidative and photosynthetic phosphorylation. *Biol. Rev. Cambridge Phil Soc.* 41, 445-502.
2. Deisenhofer, J., Epp, O., Miki, K., Huber, R. and Michel, H. (1984) X-ray structure analysis of a membrane protein complex. Electron density map at 3 Å resolution and a model of the chromophores of the photosynthetic reaction center from *Rhodospseudomonas viridis*. *J. Mol. Biol.* 180, 385-98.
3. Iwaki, M., Kumazaki, S., Yoshihara, K., Erabi, T. and Itoh, S. (1996) ΔG^0 dependence of the electron transfer rate in the photosynthetic reaction center of plant photosystem I: Natural optimization of reaction between chlorophyll *a* (A_0) and Quinone. *J. Phys. Chem.* 100, 10802-10809.

Progress and Future of Our Science

Shigeru Itoh*

Center for Gene Research, Nagoya University