



Issue
#7

アストロバイオロジー

宇宙に生命はいますか？

制作: 米国航空宇宙局 (NASA) アストロバイオロジープログラム
エクソバイオロジー及びアストロバイオロジー局設立50周年を記念

アストロバイオロジー

米国航空宇宙局(NASA)
エクソバイオロジーとアストロバイオロジーの歴史

このコミックブックは宇宙における生命の物語、少なくとも、これまでにわかっている宇宙生命についての物語です。科学者たちは、生物が住んでいる環境や、生物と環境との関係の理解に努めてきました。そして、特にアストロバイオロジーの研究者たちは、地球だけでなく、私たちの住む宇宙全体を含む環境を研究してきました。

2010年、米国航空宇宙局(NASA)におけるエクソバイオロジー並びにアストロバイオロジーの研究は、開始から50年の節目を迎えました。これを記念し、アストロバイオロジープログラムチームは、このコミックブックを制作しました。このコミックブックでは、エクソバイオロジーとアストロバイオロジーの研究に携わってきた重要な研究者や、研究上の出来事が描かれています。

研究の歴史はわずか50年と比較的若い研究分野ですが、アストロバイオロジーの研究者が解明しようとしている謎は、人類がこれまでずっと考え続けてきた疑問なのです。

原作(英語)

企画

メアリー・ポイテック リンダ・ビリングス アーロン・グロンストール

イラスト

アーロン・グロンストール

脚本

アーロン・グロンストール

編集

リンダ・ビリングス

日本語版製作



藤島 皓介 桜井 隆 服部 玲子

リチャルディ 華子 秋山 京子

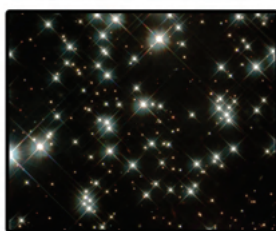
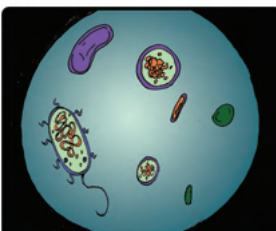
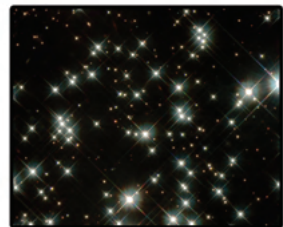
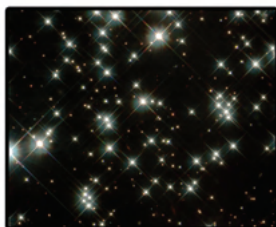
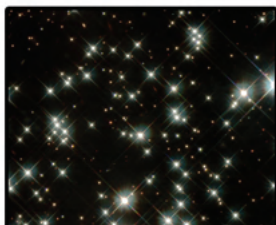
東京工業大学地球生命研究所(ELSI)は世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)の拠点のひとつです。WPIとは、世界から第一線の研究者が集まる、優れた研究環境と高い研究水準を誇る「目に見える拠点」の形成を目指す文部科学省の事業で、2007年に始まり、現在13カ所の拠点があります。2012年に発足したELSIの研究テーマは、地球と生命の起源、そして地球と生命はどのように影響を及ぼし合いながら進化してきたかということです。NASAが制作した本書の原作には、生命の起源に関する様々な研究が紹介されていますが、そこには、ELSIに所属する多くの研究者が登場します。

そこで、ELSIが日本版を制作することがNASAによって認められました。

Copyright 2019, NASA Astrobiology Program

第7巻

生命誕生以前の化学環境と生命の起源



NASAのアストロバイオロジープログラムは、もともと1960年にエクソバイオロジープログラムとして設立されました。1990年代になってプログラム内容を拡大し、アストロバイオロジープログラムへと発展し、2010年に50周年を迎えました。

半世紀にわたる研究を記念して、このコミックブックでは、アストロバイオロジーの分野がどのように発展してきたのか、そして生命の探索がNASAの宇宙探査の科学的戦略としていかに重要な要素になったのかを伝えようとしています。

本号は、一連のコミックブックの第7号です。アストロバイオロジーという研究分野がどのように確立されてきたのか、すべてを描くのはとても難しいですが、転機となった重要な事柄やキーパーソンに焦点をあてて描いています。

編集者 リンダ・ピリングス

アストロバイオロジーは、
宇宙で生命が生まれる
可能性を研究する分野だ。

アストロバイオロジーの研究者は、
様々な科学分野の出身者で構成されている。
そして、宇宙における生命の役割を
理解するために、あらゆる方法を
駆使して研究を進めている

僕たちは、「生命とは何か」を知りたい。
だから、地球や太陽系、太陽以外の
恒星を公転している惑星の研究を
してきた。

ナサニエル・バーゴ
東京工業大学
地球生命研究所

でも宇宙に生命がいるかどうか
の可能性を探るには、地球で
どうやって生命が誕生したかを
知る必要があるの!

セラ・マール
セントラル
コネチカット
州立大学

その通り! 地球以外の世界の
生命を知りたかったら、まず
地球生命について知らなくちゃね。

イレーナ・ママジャノフ
東京工業大学
地球生命研究所

そうね、「私たちが知っている
生命とは何か」をまずは
知しましょう。

地球生命の起源を研究すれば、
生命が宇宙にありふれているかどうか
探ることができる。生命の起源を
研究することは
アストロバイオロジーのメインテーマよ。

メアリー・ポイトック
アストロバイオロジー
プログラムディレクター、NASA本部
東京工業大学
地球生命研究所

7巻: 生命誕生以前の化学環境と
生命の起源

生命の起源の研究を、一番単純なところ「細胞」から始めてみよう



ジェフリー・バーダ
スクリップス海洋研究所
カリフォルニア大学サンディエゴ校

生物の細胞はすべて同じ材料からできているのね



生命の起源を理解することは、細胞の材料物質がどのように使われて、最初の細胞になったかを理解することなんだ。

(文献1,2)

そのためには、材料物質がどこからやってきたのかを知る必要がある。

その問題を議論するときに、生命誕生前の世界とアストロバイオロジーがつながるんだ。



どうやって生命が誕生するかという化学実験については、1953年にスタンレー・ミラーが発表した論文が有名ね。(文献3,4)

キャロル・クリーランド
コロラド大学
ホルダー校



還元ガスに雷放電を与えて、ミラーは生命に必要な基本物質をつくったんだよね



クリス・チャイバ
プリンストン大学

私の実験が近代的な研究が始まるきっかけになったんだよ。

では、それまでの歴史を振り返ってみよう。

スタンレー・ミラー
1930-2007



1巻参照

フリードリヒ・ヴェーラー(1800-1882)は世界ではじめて無機物から有機物を合成した。(文献5)

フランス人科学者ルイ・パスツール(1822-1895)は1859年に大きな一歩を踏み出した

フランス・パリ
ソルボンヌ大学

シアン酸アンモニウムを加熱すると尿素ができるぞ!

何だって?

頭がおかしいのかしら

動物の腎臓がなくても尿素がつくれるんだ!

1828年のドイツ、ベルリン専門学校

これは自然発生説に大きな打撃を与えるぞ!

白鳥の首フラスコ実験(文献6)

パスツールは、「生命はどこからともなく現れるわけではない」ということを証明した

細菌が無菌状態の液体の中から自然に発生することはない。フラスコの蓋をあけておくと、細菌が外から入り込むんだ。

フラスコの口が曲がっていると細菌が入り込まない。だから中の液体が無菌のままになるんだ。

この頃、チャールズ・ダーウィン(1809-1882)は、あの有名な生命進化論を提唱した。

もちろん、面白くないと思う研究者たちも少なくなかった。(文献4)

進化だと?

1871年のロンドン、ケルビン卿(1825-1907)

ダーウィンは、生命の起源については語らなかったが、仲間たちとは議論を重ねていた。(文献7)

生命は宇宙から隕石とともにやってきたんだ

奇妙な仮説だ

面白い仮説だ!

ヘルマン・フォン・ヘルムホルツ(1821-1894)

スヴァンテ・アレニウス(1859-1927)

世界中の科学者の多くが生命の構成物質をつくる化学反応を研究しはじめた

1914年、ハーバード大学

最初の生物は酵素みたいなものだったかもしれない。そういう分子が化学反応の速度を制御するのに一役買ったのかも。

水と油を混ぜると細胞みたいなものができる。光合成の起源か？形質形成の起源か？とにかく生命の起源の手掛かりになりそうだな…。(文献5)

1902年メキシコシティ
アルフォンソ・ヘレラ
[1868-1942]



おそらく初期の海洋に出現し、自己複製もできたのだろう。(文献5)

レナード・トローランド
(1889-1932)

主要人物の一人は、ソビエトの生化学者アレクサンドル・オバーリン…

生物誕生以前にできた有機化合物が原始的な「スープ」を生み出した。生命はこの「化学的スープ」から進化したに違いない。

そして、英国生まれのインド人科学者、J.B.S.ホールデン(1巻参照) (文献8,9)

まったくそのとおりだ。まさに「原始スープ」だね。

「原始スープ(primordial soup)」という単語は1929年の論文で初めて使われた(文献9)

1924年、モスクワ

1929年、ケンブリッジ

1939年、ロンドンの王立研究所

現在知られている全てのタンパク質は、他のタンパク質によって作られたのだ。それが順番に進んでいったのだ。(文献10)

ばかげた話だ!

興味深いわね。*

(文献10)

X線結晶構造解析のバイオニアであるジョン・デズモンド・バナール[1901-1971]

すごく面白いわね**

*ノーベル化学賞受賞者(タンパク質の結晶構造解析法の開発)ドロシー・ホジキン(1910-1994)

**ロザリンド・フランクリン(1巻参照)

ダブリンでは、物理学者のアーウィン・シュレディンガー(1887-1961)が風変わりなトピックについて3つの講義を行った。



1943年、ダブリンのトリニティ・カレッジ

生物という物体の中で起きる事象は、物理や化学ではどのように説明できるのでしょうか? (文献11)

科学は急速に進歩し続けた...



オーバーリンの来賓講演 (シカゴ大学)

私たちは、生物がいなくても有機化合物の合成は可能であることを示さなければなりません。だって、隕石の中に有機物があるんですから。

どうやるの?
シーっ、静かに。



カリフォルニア大学バークレー校のメルヴィン・カルヴィン [1911-1997]

私の研究室では、地殻の放射線環境を模擬した実験で有機物の合成をやってみたが、うまくいかなかった...

シカゴ大学のハロルド・ユリー [1893-1981]



還元気を持つ初期の地球をモデル化してみたよ

へええ...



あ、そうか!
いいコト思いついたぞ!

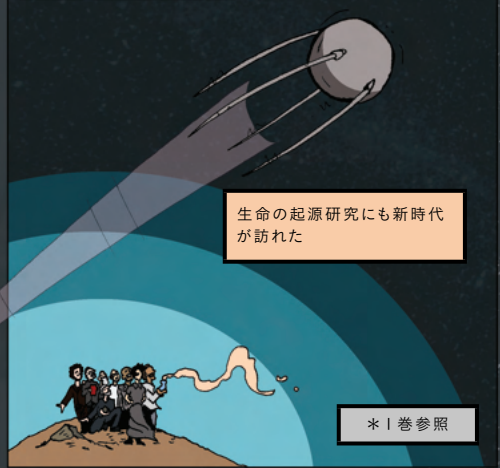


いろいろな異なる分野の科学者たちが面白がって僕たちの実験や研究に加わってくれた。

1950年代になると、前生物学的化学を研究する科学者が分子生物学者と力を合わせ始めた。

生命の起源の問題を解決するには、協力しなくちゃね。

宇宙時代の到来を告げるスプートニク打ち上げとともに、*



生命の起源研究にも新時代が訪れた

* | 巻参照

星も研究しなくては
いけない。

条件が揃えば、その星で生命が
現れていたかもしれないからね。
(文献12)

マイケル・ニュー
NASA
科学ミッション本部
(SMD)

宇宙探査は地球外生命の問題を
正統な学問分野に変えたね。



それに、生命の起源の
研究に拍車をかけたわよ。

ペトゥール・カサール
アリゾナ大学

NASAは当初から多額の
資金を提供しているわよね。

科学にとっては
とっても有難かったね。

デビッド・ディーマー
カリフォルニア大学
サンタクルーズ校





それで、どうなったの？

アンドリュー・スティール
カーネギー研究所

いつ、どこで、どうやって、そしてなぜ
地球の生命が生まれたのかは、
今でもまだ分かっていないの。

実は…生命とは何かという
ことさえまだよく分かって
いないのよ。(文献13)

まず、「生命とは何か」
から始めようよ。

スティーブ・ベナー
FAME*

生命とは何かを定義
するだけで一冊の本が
できちゃう！

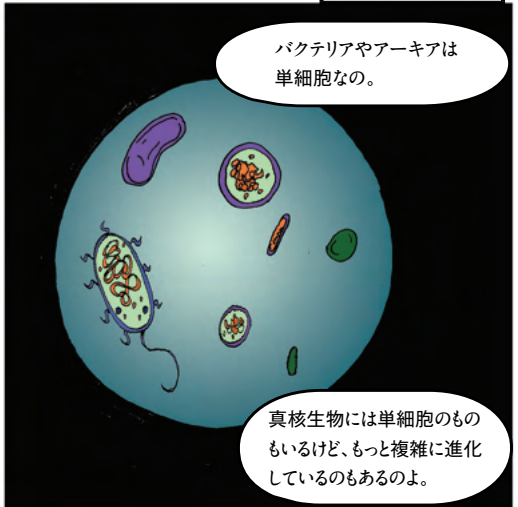
本どころか、図書館
もできるかも

* FAME:
応用分子進化財団
Foundation for
Applied Molecular
Evolution



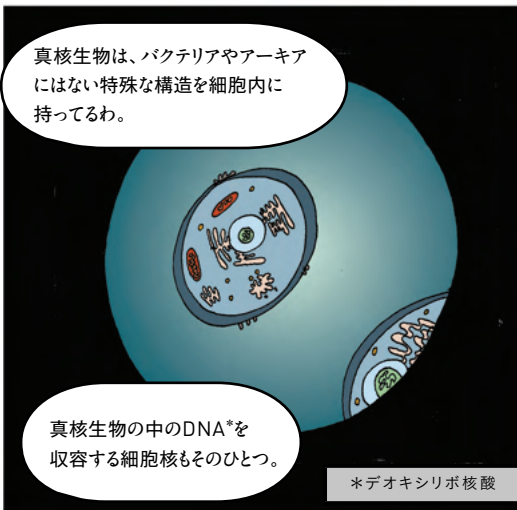
最も基本的なレベルでは、地球上の
生命は細胞として存在しているの。

私たちが知っている生命には、
真正細菌(バクテリア)、
古細菌(アーキア)、真核生物
の3つの種類があるのよ。



バクテリアやアーキアは
単細胞なの。

真核生物には単細胞のもの
もいるけど、もっと複雑に進化
しているものもあるのよ。



真核生物は、バクテリアやアーキア
にはない特殊な構造を細胞内に
持っているわ。

真核生物の中のDNA*を
収容する細胞核もそのひとつ。

*デオキシリボ核酸



真核生物には、多細胞の
ものもあるのよ。

多細胞っていうのは、沢山の
細胞が一つの生物を
作るっていうことなの。



真核生物の場合、細胞が協力して木のような大きな複雑な生物を作ることができるんだよ。

にゃあ

にゃあ

ロジャー・サモンズ
マサチューセッツ
工科大学(MIT)

メアリー・ドロオーサー
カリフォルニア大学
リバーサイド校

ロジャー・ビューイック
ワシントン大学

犬だって
多細胞よ

猫も多細胞

ワンワン

セイウチも
多細胞

恐竜だって多細胞!

べつүүл!
気を付けて

大丈夫よ~

ジム・クリーブス
東京工業大学
地球生命研究所

そして、もちろん人間も
多細胞生物のひとつ。

みんな複雑な生命体
なのね。

BOOM!

サラ、
もう降ろしてよ

ローラ・バージ
NASAジェット
推進研究所

でも、生命はもともと複雑
だったわけじゃないのね

キャロン・ロジャース
レンゼラー
工科大学

単細胞って覚えてる？

「いつ」「どうやって」生命が生まれたかを解明するために、単純な生命に焦点を当てる必要があるわね。

地球の岩石記録を辿っていくと、生命が「どうやって」始まったのかを探ることができるんだ。

最初は単純な単細胞生物として始まったけど、時間とともに複雑になったんだ。

スティーブ・モイジャス
コロラド大学
ボルダー校

ANT 人新世 ENE

CE 新生代

アビゲイル・オールウッド
NASAジェット
推進研究所

でも、生命の最初の細胞の化石はないんだよね。大型生物の恐竜の化石は残っているのよね。

中には、ストロマトライトのような構造や化学的な手掛かりを岩石の中に残している微生物もある。

でも、数十億年も前に地球上にあった岩石を見つけるのは難しいんじゃない？

生命の痕跡だって残ってないんだ。

地球が生まれてから46億年もたってるんだもの。

ジャーダ・アーニー
NASA ゴダード
宇宙センター

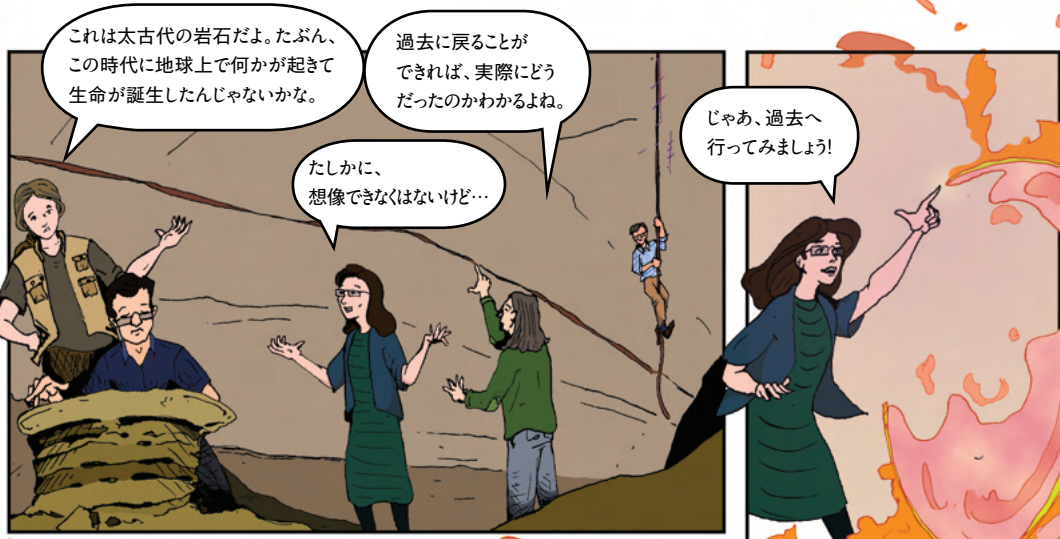
最初の頃の生命の記録は残っていないんだけど、約38億年前には生命が存在していたことがわかってきたんだ。

PROT 原始代 ZIIC

生命がいつから始まったのかについて、大雑把な時期がわかってきたんだよ。

ダウン・サンナー
カリフォルニア大学
デビス校

マーク・ディッツラー
NASA エイムズ研究センター



これは太古の岩石だよ。たぶん、この時代に地球上で何かが起きて生命が誕生したんじゃないかな。

過去に戻ることができれば、実際にどうだったのかわかるよね。

たしかに、想像できないけど…

じゃあ、過去へ行ってみましょう!



太古の地球へようこそ!

まるで異世界だね。

ここで生命が誕生したんだよ。

60年代の終わり頃には、我々が考えていた太古の地球像に、2つの大きな問題があることが指摘されていたんだ。

ジャック・ショスタク
ハーバード大学

*6巻参照



太古の時代に、地球の大気や海がどういふものだったか、私たちはまだ知らないのよね。

現在の生物の細胞を見ると、何十億年もの進化の結果、生命をつくる部品に何が使われるようになったのかわかるの。

それが、DNA、RNA^{**}と、タンパク質ね。

温度とか、それ以外にもいろいろなことを調べないと。

いろいろな条件が組み合わさって、生命を生む化学反応が起きたんだよね。

サンプルを採って研究室へ帰りましょう!

*ネリボ核酸

DNAやタンパク質みたいな分子は、すべての生物の細胞に必要だと考えられているんだ。

あるいは少なくとも、それに似た分子を持っていたはずだね。

そういう分子のうち、いくつかのものは、最初の生物が持っていたのかもしれない。

そして、それらの分子が、地球上のすべての生物の間で受け継がれてきたんだ。

そういう分子がどうやってできたのかを解明することが、生命の起源を理解する鍵になるかもしれないわね。

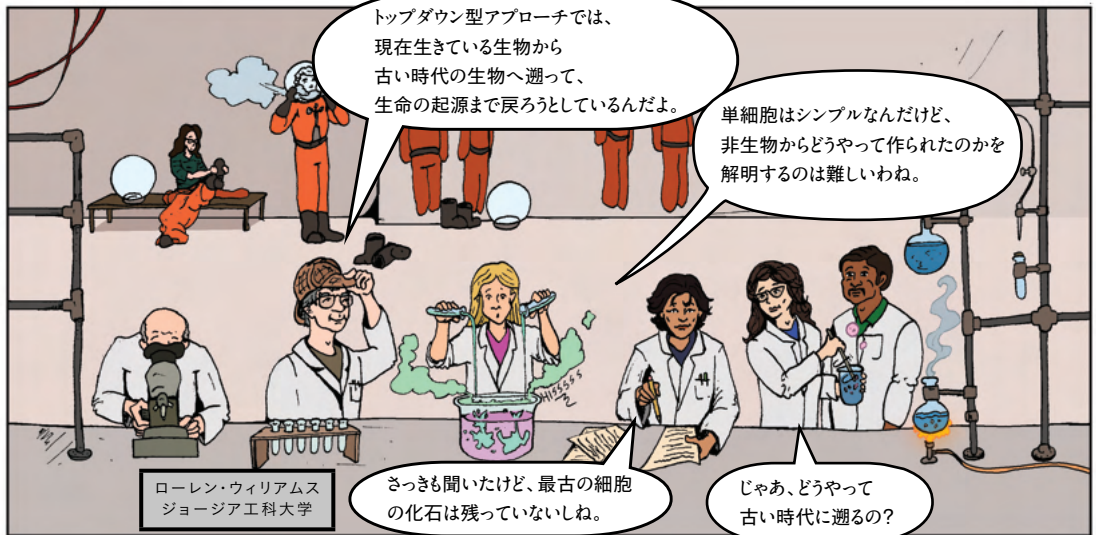
他にも大きな疑問が残っているよ。生命活動は「どうやって」始まったのか？

ニコラス・ハッド
ジョージア工科大学

その問題に取り組むために主に2つのアプローチがあるんだよね。トップダウン型とボトムアップ型のアプローチだよ。

おっと！





トップダウン型アプローチでは、
現在生きている生物から
古い時代の生物へ遡って、
生命の起源まで戻ろうとしているんだよ。

単細胞はシンプルなんだけど、
非生物からどうやって作られたのかを
解明するのは難しいわね。

さっきも聞いたけど、最古の細胞
の化石は残っていないしね。

じゃあ、どうやって
古い時代に遡るの？



生物学的証拠を
探したら？

遺伝子とか？

化学反応は？

DNAは生命の青写真
とされているよ。



たくさんの生物のDNAを
見ていくと、時間とともに
分子がどう変化したかを
追跡できるんだ。

DNAは世代を超えて
受け継がれているからね。



それを辿って行って、全ての
始まりとなった元のDNAを
探せばいいんだ。



そうすることで、LUCA
(全生物の最終共通祖先)
まで辿ることができるのね。

DNAは細胞が作り出すタンパク質を決めている。でも、DNAをつくるためにはタンパク質が必要なんだ。

これは問題だ。

タンパク質は、DNAを作るときに重要な化学反応の触媒として機能しているんだよ。

鶏が先か、卵が先か、という問題ね。

そして、3人の科学者が、それぞれ重要なアイデアを思いついた。

(文献5)

DNAだけが情報の運び屋だったわけじゃない、と思う。

カール・ウーズ
[1928-2012]

もしかして、最初の生命はDNAではなくRNAを基本にしてたんじゃないか？

フランシス・クリック
[1916-2004]*

タンパク質のような分子は、生物の進化の歴史を記録することができるんじゃないかな。

レズリー・オーゲル
[1927-2007]

これを聞いた人たちは、最初は懐疑的だった。しかし、研究をさらに進めていくと、遺伝子とタンパク質の両方が生命の進化に関する情報を持っていることが明らかになった。

*1巻参照



現在、僕たちが作った「生命の木」には、
大きな3つの枝がある。
そして、全ては共通の起源につながっている。*

でも、時間を遡って関係性を
辿るのは難しそうだね。

だって、遺伝子がひとつの
枝に沿って全部進化するわけ
ではないんだもの。

なんと、遺伝子は親から子孫に受け継が
れるだけではないんだ。遺伝子が自分と
関係ない他の生物の中に入りこんでしまう
「水平伝播」ということが起こりうるんだ。

ウイルスなんかは、
木の中のある枝から別の
枝に遺伝子を運んだり
することができるんだよ。

もう一つの問題は、木の枝の
最も古い部分が地球上に
残されていないってことね。

それに、もしかすると、
ずっと前に絶滅してしまった枝だっ
てあるかもしれないよ。

どうやるのか、
見当もつかないな…

*だいたいこの部分は、
文献15参照



生命の木の枝に沿って時間を遡ると、地球の生物がどう進化してきたのかを知るヒントになるね。

最古の生物の遺伝子だってわかるようになるかもしれない。



そういう遺伝子は一匹の生物だったかもしれないし、相互作用しあうタイプの生物だったのかもしれない。(文献16)

それに、わかるようになるのは遺伝子だけじゃないよ。

ジェラルド・ジョイス
ゾーク研究所



生命が誕生した時には、沢山の化学反応があったはずだ。

化学反応っていうのは、生きている細胞の代謝の道筋を意味している。



基本的な代謝経路や、生体に必要な生命構成部品は、すべての生物に共通しているの。

それは、生化学における普遍性と呼ばれているんだよね。(文献16)



つまり、基本的な代謝反応はとても古いということね。おそらく地球上のすべての生物の共通祖先にまで遡ることになるでしょう。

全生物の共通祖先であるLUCAが生まれたのは、約38億年から35億年前ではないかと私たちは推定しているの。(文献17)

遺伝子と代謝を追跡することで、LUCAがどのようなものであったかを知ることができるはずよ。

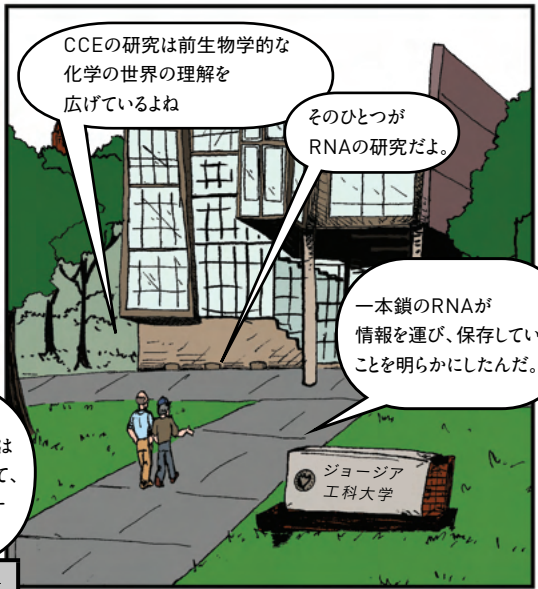


別の方法で追跡しようと思ったら、RNAやリボソームのような分子も役に立つよね。

2007年に、NASAのアストロバイオロジープログラムはアメリカ国立科学財団(NSF*)と提携して、ジョージア工科大学の化学進化センター(CCE**)に資金を提供したんだよ。

*NSF:National Science Foundation

**CCE:Center for Chemical Evolution



CCEの研究は前生物学的な化学の世界の理解を広げているよね

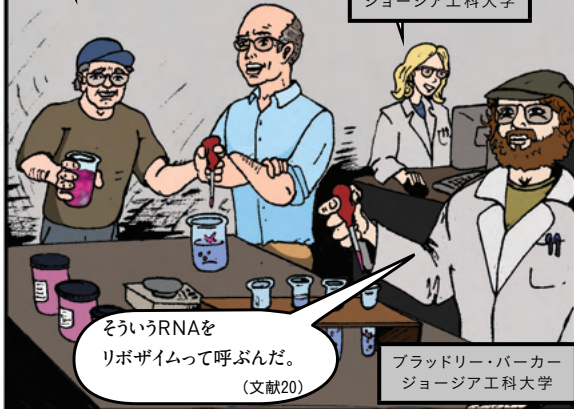
そのひとつがRNAの研究だよ。

一本鎖のRNAが情報を運び、保存していることを明らかにしたんだ。

80年代初頭に、科学者たちはRNAが細胞内の反応を触媒することを発見した。

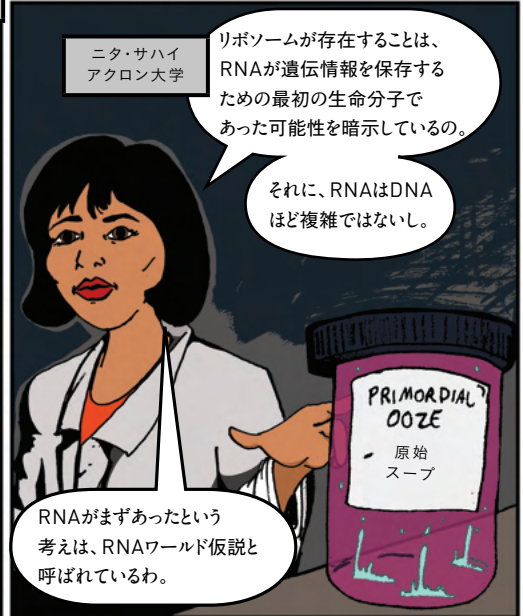
つまり、RNAは、酵素と同じように働くということ。生命にとって必要な反応を速めることができるの。(文献18,19)

マーサ・グローバー
ジョージア工科大学



そういうRNAをリボザイムって呼ぶんだ。(文献20)

ブラッドリー・バーカー
ジョージア工科大学



ニタ・サハイ
アクロン大学

リボソームが存在することは、RNAが遺伝情報を保存するための最初の生命分子であった可能性を暗示しているの。

それに、RNAはDNAほど複雑ではないし。

RNAがまずあったという考えは、RNAワールド仮説と呼ばれているわ。

もしLRNAが原始スープの中でつくられたとすると、初期の原始細胞の反応を触媒した可能性があるね。

トーマス・チェック
コロラド大学
ボルダー校

それに、遺伝情報を持っていた可能性もあるよね。

シドニー・オルトマン
イエール大学



もちろん、可能性はそれだけではないの

初期の地球上の鉱物は、RNA重合の促進から初期の代謝の触媒まで、なんらかの役割を果たしていたかもしれないの。(文献24)

今では、細胞内のほとんどの反応を触媒するのはタンパク質なの。でも、RNAが一番最初にできた可能性だって捨てきれないわね。(文献21-23)

リンダ・マッカウンレンセラー
工科大学

FIZZ!
POP!

ファカンドー・フェルナンデス
CCE, ジョージア工科大学

でも、生命の最初の遺伝システムに
関与していたのは RNA だけじゃないよね。

ペプチドが何らかの役割を果たした
かもしれないよね。ペプチドは、アミノ酸が
繋がってできるんだけど、数個がつながる
だけでいいの。(文献25)

単純な粘土鉱物だって、何かの
役割を果たしていたのかも
れないよね。(文献26,27)

タミー・キャンブル
CCE,
カリフォルニア
ポリテクニク州立大学

CCEでは、トップダウンアプローチでの研究もしているんだ。
リボソームの中にあるRNAとペプチドの配列をくまなく調べて、
どの部分がすべての生命に普遍的なものなのかを理解
しようとしているんだよ。どういふふうに組み合わせさせて、時間と
ともにどう変化していったんだろう、ってね。

RNAの最初の断片がどんなもの
だったのか、そして、それがどういう風に
できたのかを知りたいわね。

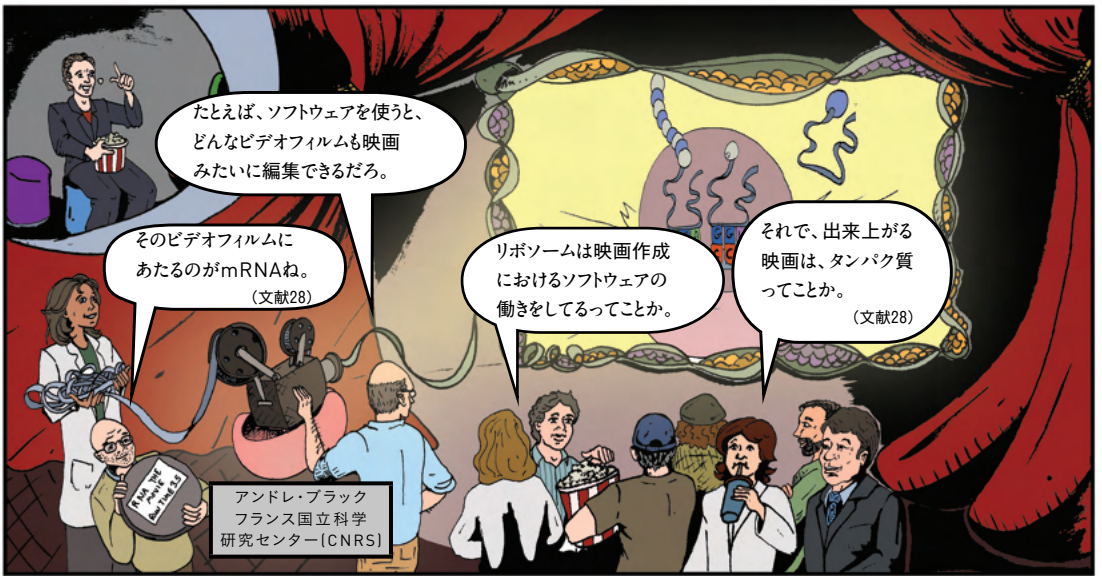
そうすれば、RNAワールド
があったのかどうか、
ちゃんとわかるはずでしょ。

リボソームについてのものすごい発見もあったんだ。
ちなみに、リボソームっていうのは、細胞内で
最終的にDNAに書き込まれた遺伝情報を
RNAを経由して翻訳する分子のことだよ。

リボソームはRNAとタンパク質
からできているんだけど、
リボソームがなければ生命は
機能しないんだ。

ASTRO
ASTRO THEATER
NOW PLAYING:
RNA THE MOVIE RATED

リボソームを映画に
例えてみよう。



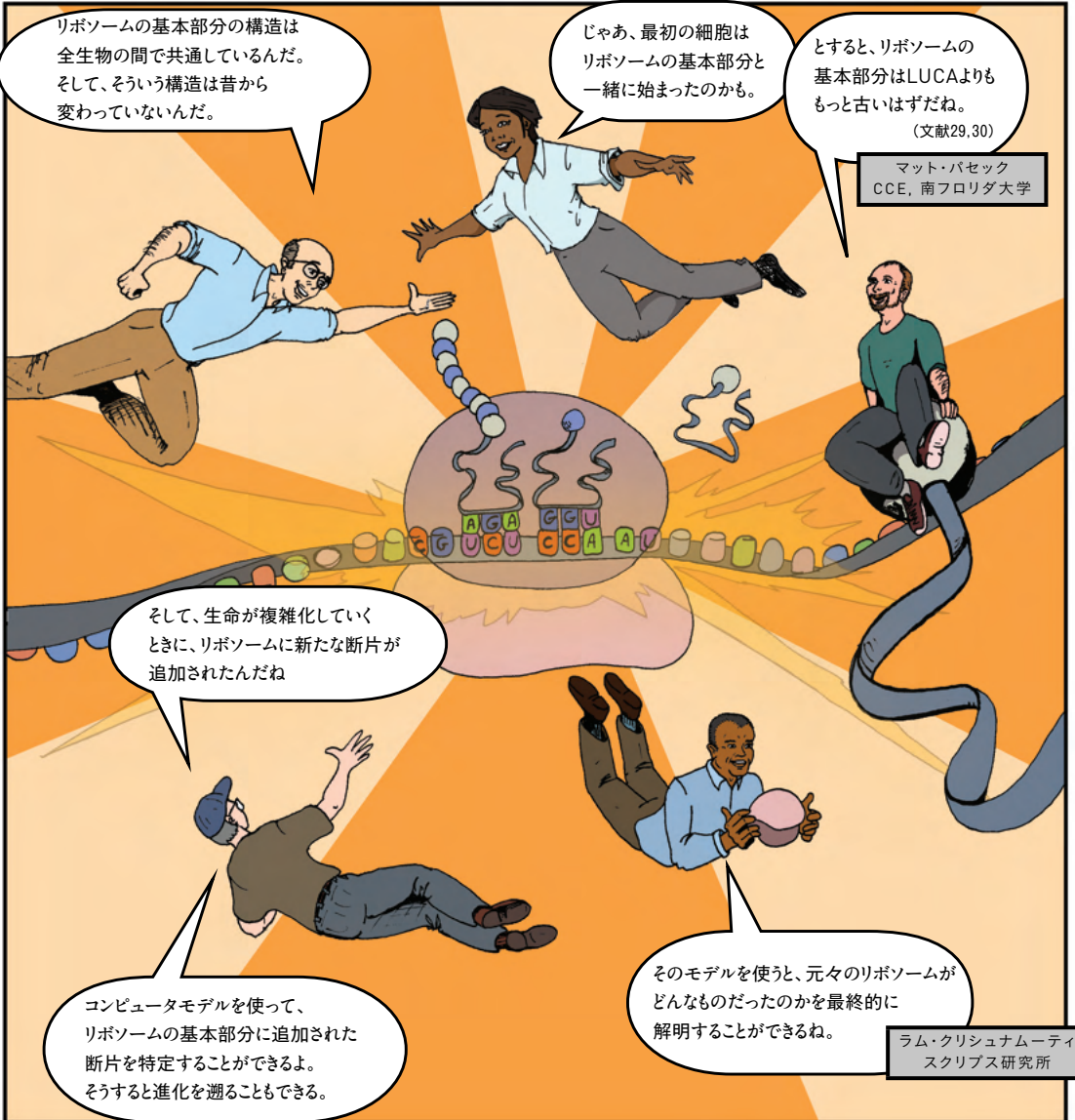
たとえば、ソフトウェアを使うと、どんなビデオフィルムも映画みたいに編集できるのだ。

そのビデオフィルムにあたるのがmRNAね。
(文献28)

リボソームは映画作成におけるソフトウェアの働きをしてるってことか。

それで、出来る上がる映画は、タンパク質ってことか。
(文献28)

アンドレ・ブラック
フランス国立科学研究センター(CNRS)



リボソームの基本部分の構造は全生物の間で共通しているんだ。そして、そういう構造は昔から変わっていないんだ。

じゃあ、最初の細胞はリボソームの基本部分と一緒に始まったのかも。

とすると、リボソームの基本部分はLUCAよりもっと古いはずだね。
(文献29,30)

マット・バセック
CCE, 南フロリダ大学

そして、生命が複雑化していくときに、リボソームに新たな断片が追加されたんだね

コンピュータモデルを使って、リボソームの基本部分に追加された断片を特定することができるよ。そうすると進化を遡ることもできる。

そのモデルを使うと、元々のリボソームがどんなものだったのかを最終的に解明することができるね。

ラム・クリシュナムーティ
スクリプス研究所



もう一つの重要な分子は、
ルビスコという酵素よ。
(文献31)

今、生きている生物のほとんどは、
太陽光エネルギーを使っているけど、
光合成を経由しないと使うことはできないの。
ルビスコは、光合成の最初の重要な
反応を引き起こすの。

ルビスコは、二酸化炭素を
取り込んで生物に必要な
有機物に変えることが
できるよ。

地球上で最もたくさん
存在しているタンパク質と
言われているわ。



それから、コンピュータ
シミュレーションで、
昔はルビスコがどんな反応を
していたのかを確かめた。

だから、できるだけ
多くの種類のルビスコを
研究したの。



シミュレーションで
昔のルビスコの構造がどんなもの
だったかもわかったのよ。

昔のタイプのルビスコを
作って、微生物の中
に入れてみたいね。
(文献32)

エリック・スミス
東京工業大学
地球生命研究所

今、リサーチ中よ
(文献33)

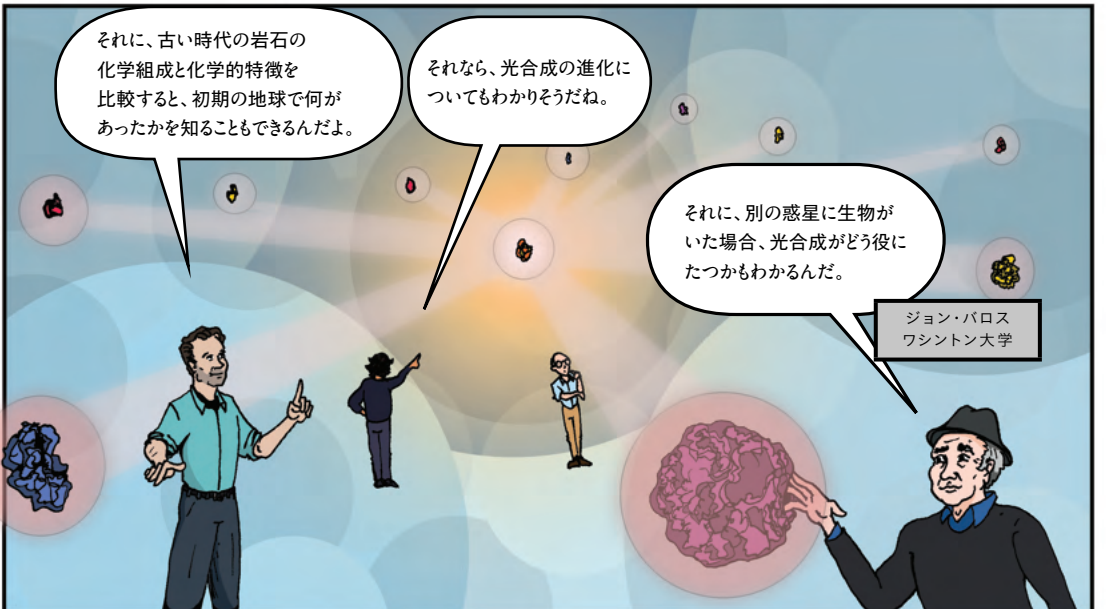


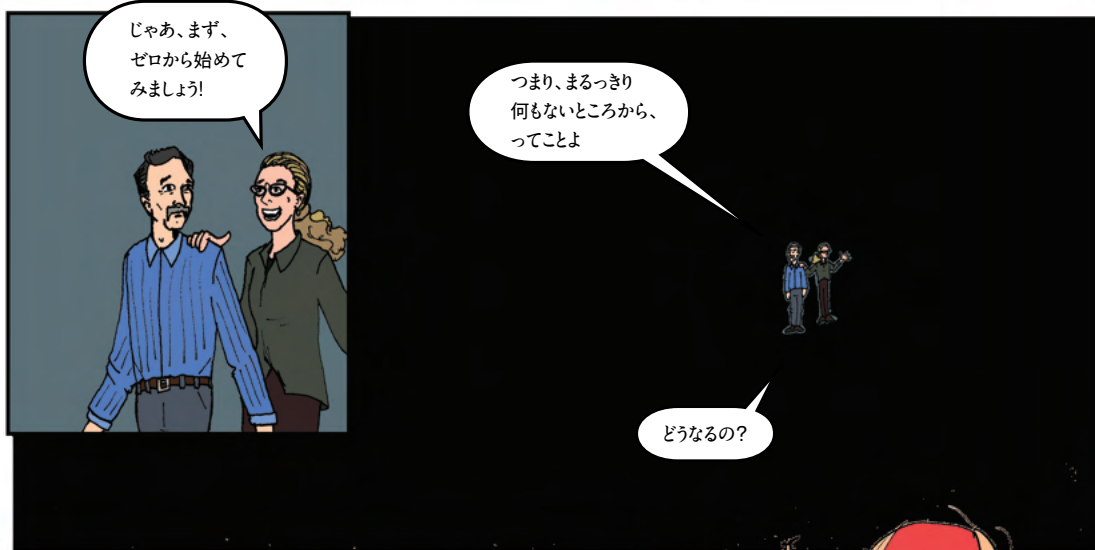
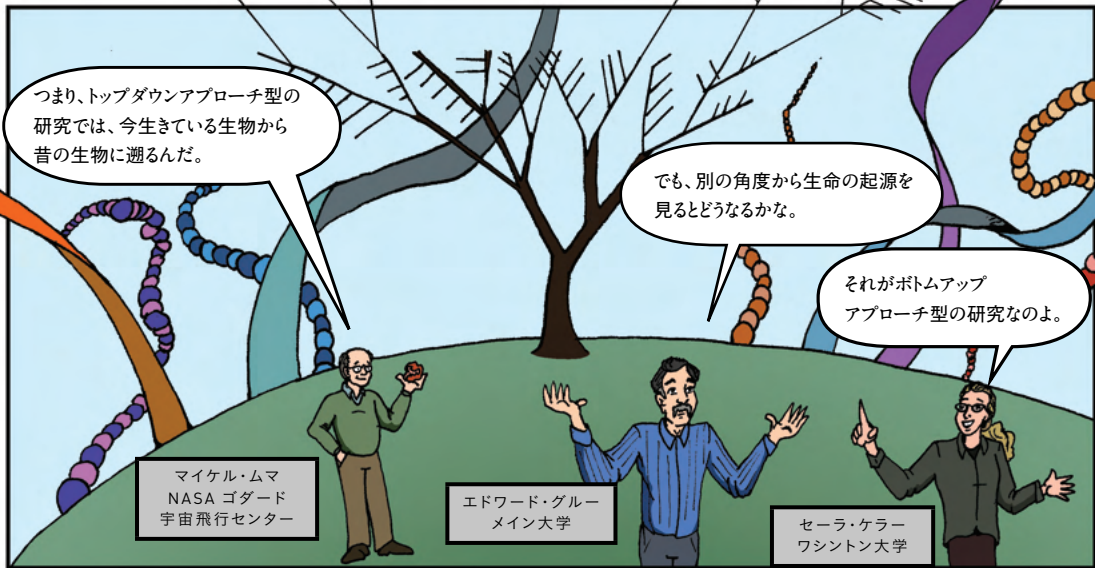
それに、古い時代の岩石の
化学組成と化学的特徴を
比較すると、初期の地球で何が
あったかを知ることができるんだよ。

それなら、光合成の進化に
ついてはわかりそうだね。

それに、別の惑星に生物が
いた場合、光合成がどう役に
たつかもわかるんだ。

ジョン・パロス
ワシントン大学









うわ。
地球ができてきた。

隕石がいろんな
物質を運んでるね。

化学反応が
おこってる。



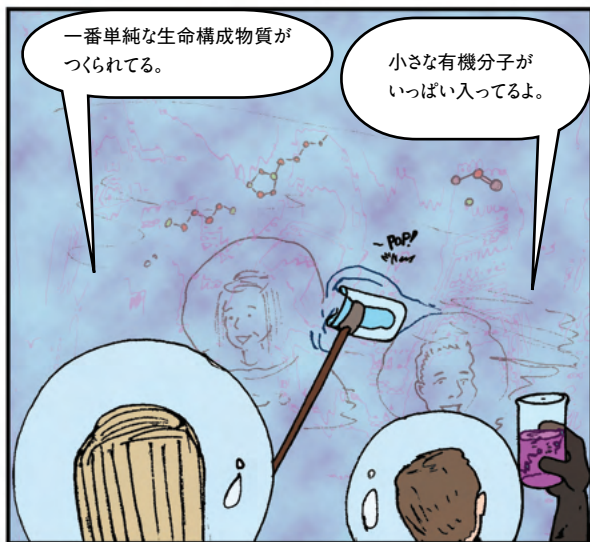
見ろ。温かくて
小さな池だ。

サンプル取って!

まずは、ごちゃごちゃとしたところ
から始まったんだな。

せかさないで。

スコット・バール
NASAジェット推進
研究所



一番単純な生命構成物質が
つくられてる。

小さな有機分子が
いっぱい入ってるよ。



これが反応してって、
もっと大きくて複雑な有機分子が
できたのね。

生命が使う化学反応は、
この時に始まったのね。



生物の全ての細胞で使われている
重要な反応経路っていうのがあるんだけど、
そういう反応のネットワークがサイクルをつくって、
生命の力になってるんだ。

こういうものを全部使って、
生命体をつくらなくちゃいけないのか。

アンドリュー・ポロレリ
NASAエイムズ研究所

これ、細胞膜みたいだよ。
(文献34)

ティム・ライオンズ
カリフォルニア大学
リバーサイド校

膜があれば、膜の内部で化学反応が
起こるでしょ。それは、細胞みたいなものよね。
これを「原始細胞」って呼んでるの。

(文献35,36)

最終的には、個別の外界から
独立した系ができあがって、
化学平衡というものから解放される。

例えば、膜の内側と外側ではイオンの量が
釣り合っていないことがある。原始細胞は、
膜をつかって物質の流れをコントロールする
からだよ。

ある時点で、細胞は生物になる。
そうすると遺伝情報を子孫に伝えて、
進化と繁殖ができるようになるんだ。

リー・クローニン
グラスゴー大学

前生物的化学の分野では、
生物が関与することなく、
いかにして有機炭素分子を
つくりだすのかを研究しているんだ。

アドルフ・ストレッカー
[1822-1871]
(文献37)

そこで「ストレッカー反応」
が出てくる。

僕の名前がついてるんだ!

「ストレッカー反応」と呼ばれる
プロセスがわかって初めて、
アミノ酸の合成方法が
わかったんだ。

マイケル・ラッセル
NASA ジェット
推進研究所

長年の研究の末、今では
いろいろなものができるよう
になったよ。

つまり、ユリー-ミラーの実験に着想を得た「オーガニックスープ」や、ダーウィンの提案した「温かく小さな池」は、

ボトムアップ型アプローチの出発点ということなのね。

合成生物学では、生命のシステムをゼロからつくる方法を研究してるの。

生命を誕生させた初期の地球で起きたような複雑な化学反応を再現するなんてできるかなあ？

ステファン・フランス
ジョージア
工科大学 (CCE)

まだ生命になっていない単純な部品から生物の複雑なシステムがどう組み立てられたのかを調べているんだよ。

エベレット・ショック
アリゾナ州立大学

だから最初に、私たちの考えた「温かく小さな池」をつくっているのよね。

それで初期の地球で起きたことを再現するの。

どうやって遺伝情報が組み立てられているのか見たいな。

遺伝情報はどうやって翻訳されて細胞に使われているんだろう？

膜はどうやってできるんだろう？



どうやったら細胞の中で自己複製ができるようになるのかしら？

エネルギーを作り出す方法って何だ？

ジェイソン・ドゥウォーキン
NASAゴダード
宇宙飛行センター

そこで、僕たちは今、実験室で新しい生命を作り出す可能性を研究しているんだ。

ルイス・カンボス
アメリカ議会図書館
アストロバイオロジー
主席研究者





ユリー・ミラーの実験は
ボトムアップ型アプローチの
ひとつの例よね。

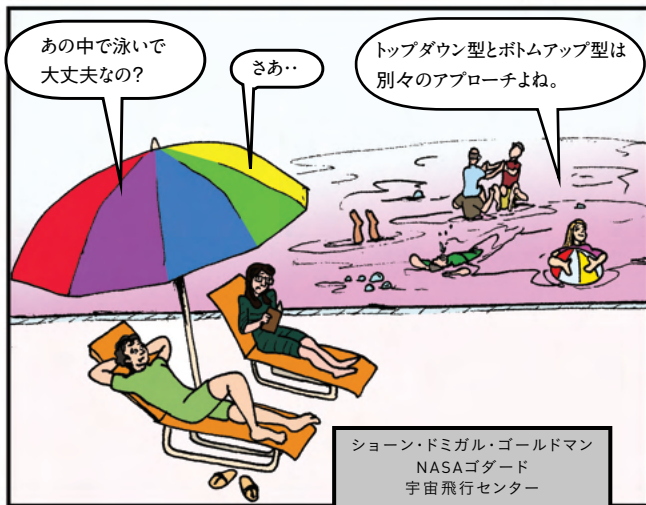
いろんな物質を混ぜ合わせて、
生命を構成する部品ができるか、
あるいは生命が生まれるかどうかを
実験したんだ。



長年の研究のおかげで、
だんだんと分かかってきたよね。

ミラーがやったような実験を
再現してみたりね。

地球の歴史や地球化学的な
新しい知識をどんどん
取り入れてね。



あの中で泳いで
大丈夫なの？

さあ…

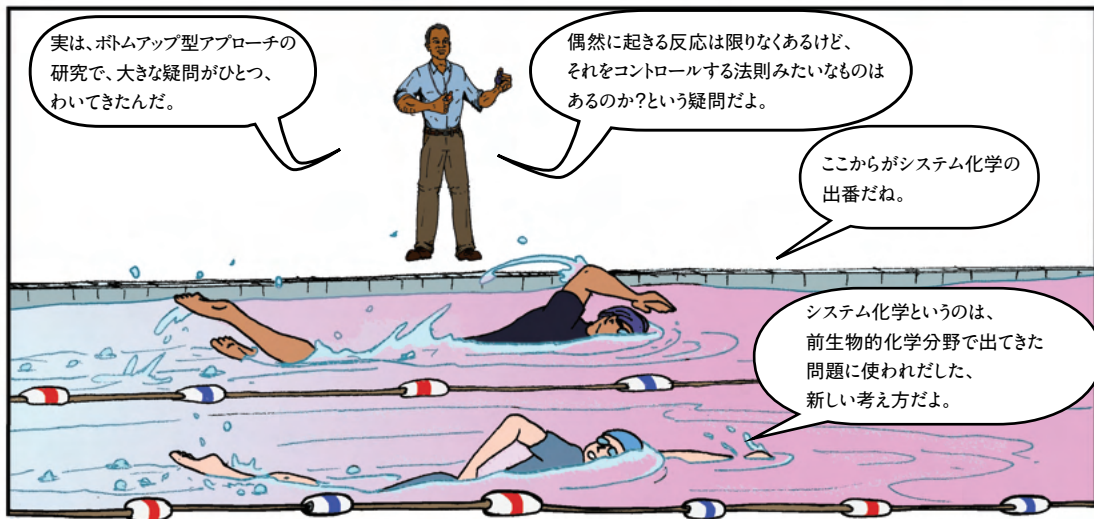
トップダウン型とボトムアップ型は
別々のアプローチよね。

ショーン・ドミガル・ゴールドマン
NASAゴダード
宇宙飛行センター



別々のアプローチで研究が
進んでいるけど、僕らは、ある
ひとつの疑問に対する答えを
みんなで探してるんだ。

じゃ、競争ね。

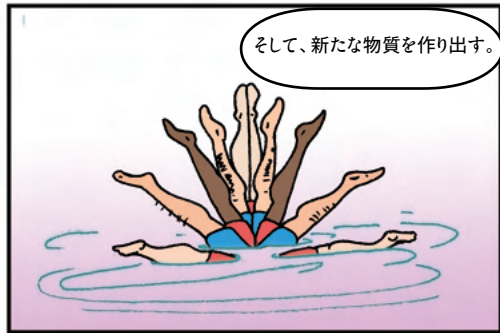


実は、ボトムアップ型アプローチの
研究で、大きな疑問がひとつ、
わいてきたんだ。

偶然に起きる反応は限りなくあるけど、
それをコントロールする法則みたいなものは
あるのか？という疑問だよ。

ここからがシステム化学の
出番だね。

システム化学というのは、
前生物的化学分野で出てきた
問題に使われた、
新しい考え方だよ。



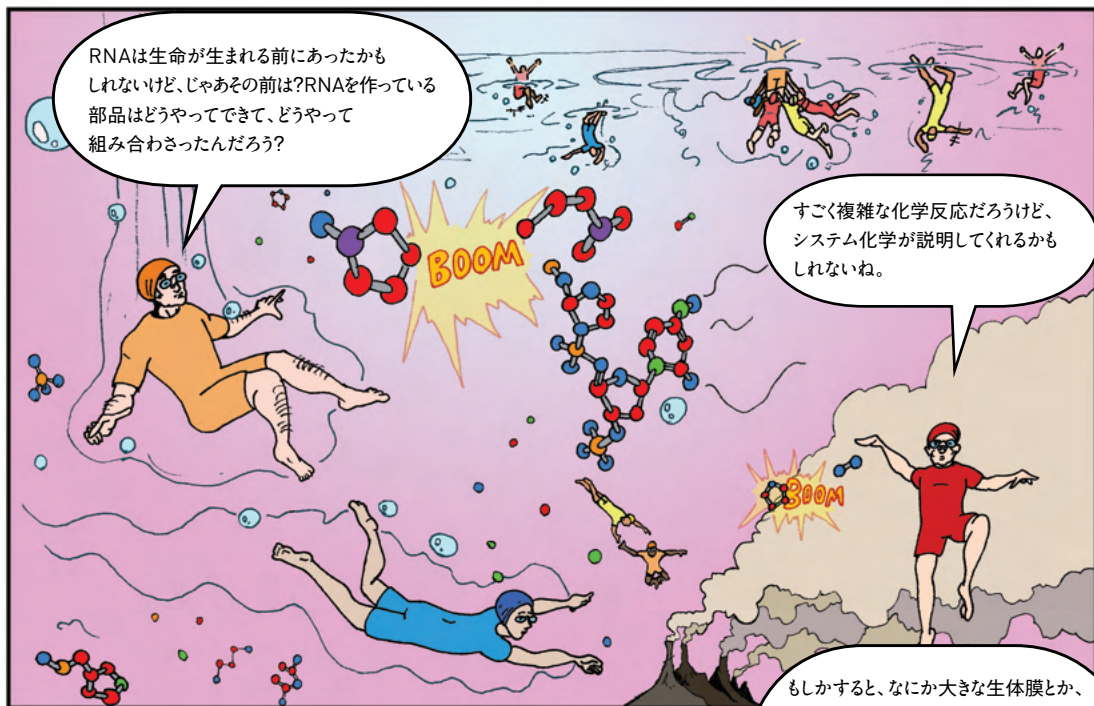
化学物質がたくさんある場合だけを問題にしているんじゃないよ。

問題は、どういった化学物質だったら反応するのか、あるいは条件は何なのかを考えるということだよ。



生命の起源に関連する反応を全部理解するのに役立つかもね。

RNAのこともわかるかもね。



RNAは生命が生まれる前にあったかもしれないけど、じゃあその前は? RNAを作っている部品はどうやってできて、どうやって組み合わさったんだろう?

すごく複雑な化学反応だろうけど、システム化学が説明してくれるかもしれないね。



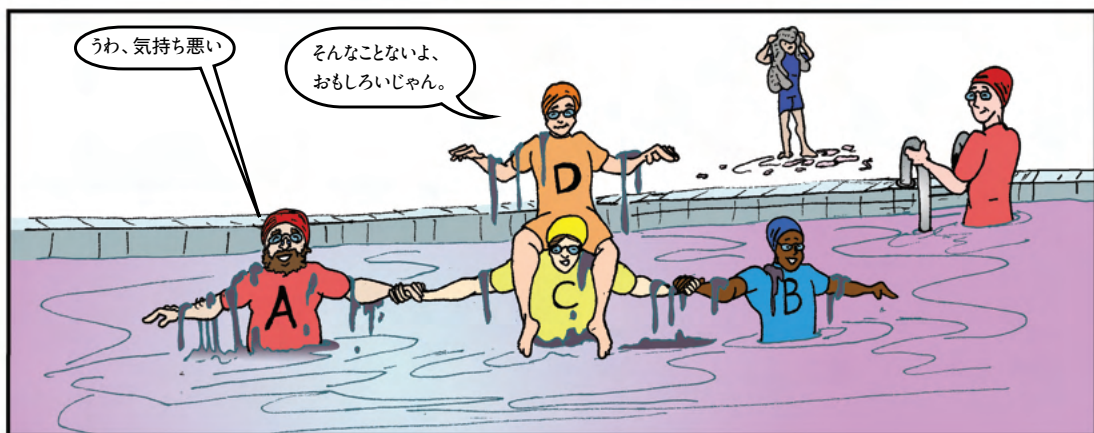
個別に何かがあったわけじゃなくて、「原始スープ」として生きていたのかもしれない。

どうやって?

もしかすると、なにか大きな生体膜とか、RNAの膜みたいなものがあったのかもしれない。生命の部品が膜の中に包まれる前はそういうものが生きていたんじゃない?

(文献39)

ジョン・ハーンランド
東京工業大学
地球生命研究所



うわ、気持ち悪い

そんなことないよ、おもしろいじゃん。

生命の進化は木というよりネットワークのようなものかもしれないね。(文献39)

ジェームス・マックノニー
マンチェスター大学

だって、遺伝子は、ある特定の生物だけのものじゃないみたいだし。

それに、生命活動が始まったあとは、すごく色々なことが起こっているわよね。

そう！
選択や競争ばかりじゃないんだ。
生命が誕生してすぐの頃には、融合や結合も起きている。


自由きままに自己複製していく孤立した有機体があったというのではなくて、統合された分子が集まってものすごく多様な共同体を作っているってカンジかしら。

小さな分子という視点から少し遠ざかって、「システム全体」を見てみると、ごちゃまぜになっているスープから生命をどう組織化するかを決める一般的な原理があるかもしれないね。

物理学みたいなもんかな。

池上高志
東京大学

それか、今まで考えたことがないようなものかもしれない。



いろいろな化学物質が
集まったときの挙動というのは、
鳥が集団で飛ぶ行動に似ている。

どういこと？

群れをつくる鳥の数があるレベルに達すると、
それぞれの個体はグループ全体の行動を
コントロールできなくなってしまう。
でも、その代わりに、グループ全体が
ひとつになって行動し始める。

ウィキペディア
みたいなもんだな？
(文献40)

ウィキペディアでは生命の
起源はわからないわよ。

サイモン・ディデオ
サンタフェ研究所

それは、人間の心と社会の
相互作用とも関係しているんだね。

個人の行動を予測することはできないけど、競争と協力といったことに関して、予測可能なパターンというものがでてくる。

もしかしたら、それが生命の起源でもあてはまるのかも。分子レベルではよくわからないけど、全体を見るとパターンがわかる…

なるほどね

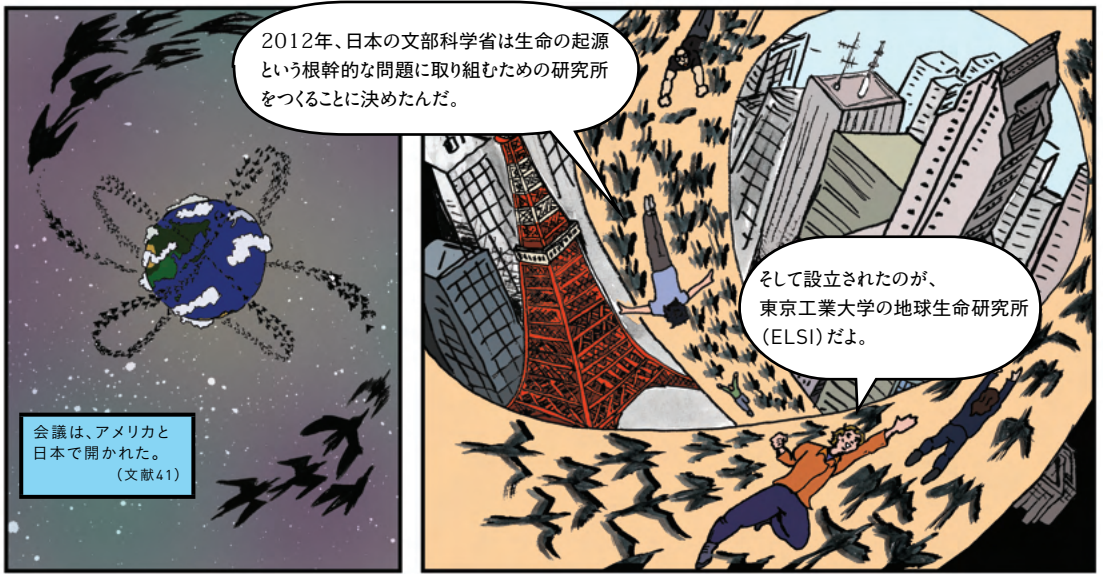
だから、私たちは今、生きた細胞を構成する小さな欠片の向こう側を見ようとしているんだよ。

「特定の分子がどうやって作られて、進化していったかを解明することはもちろん重要だが、それだけでは生命の起源の核心的な問題を解決できない。」
って誰か言ってたな。 (文献41)

ジョージ・コーディ
カーネギー研究所

生命の起源を知るためには、もっと大きな視点の一般的な原理があるかもしれないのね。

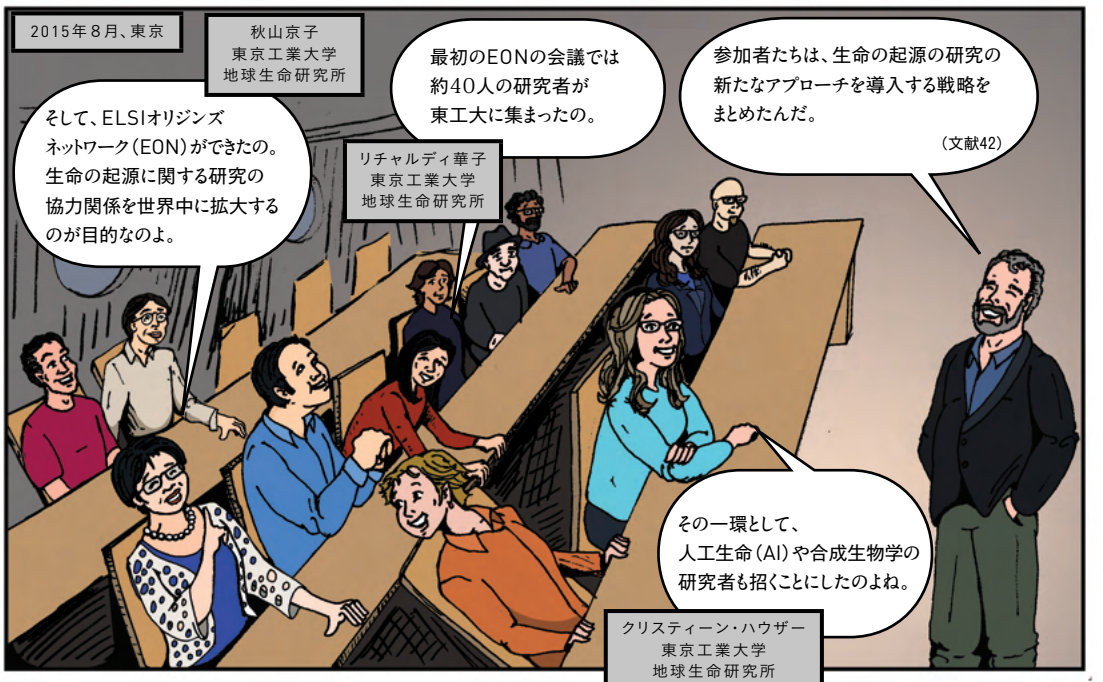
2014年に「生命の起源のモデル化(MOL)」と呼ばれる活動が始まった。



2012年、日本の文部科学省は生命の起源という根幹的な問題に取り組むための研究所をつくることに決めたんだ。

会議は、アメリカと日本で開催された。
(文献41)

そして設立されたのが、東京工業大学の地球生命研究所(ELSI)だよ。



2015年8月、東京

秋山京子
東京工業大学
地球生命研究所

最初のEONの会議では約40人の研究者が東工大に集まったの。

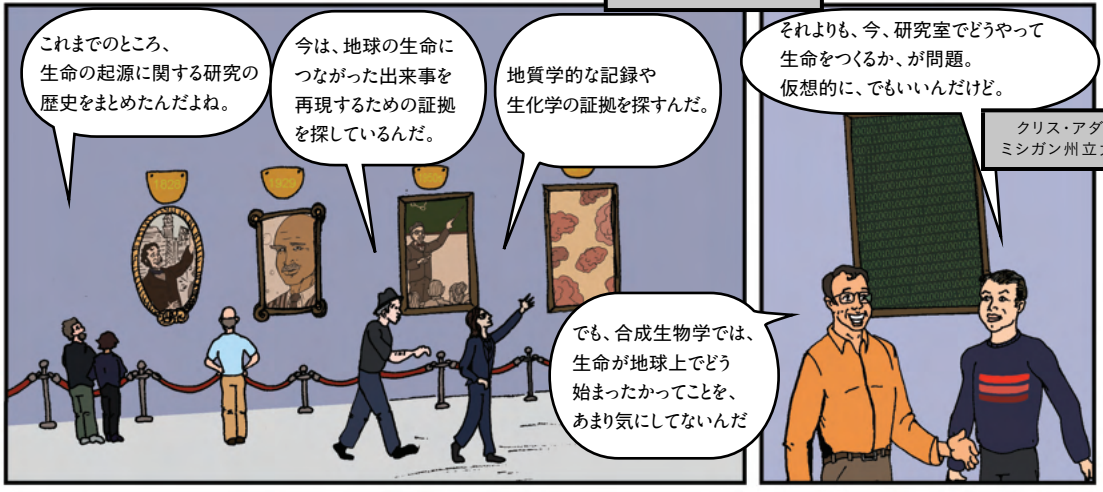
参加者たちは、生命の起源の研究の新たなアプローチを導入する戦略をまとめたんだ。
(文献42)

そして、ELSIオリジンズネットワーク(EON)ができた。生命の起源に関する研究の協力関係を世界中に拡大するのが目的なのよ。

リチャルディ華子
東京工業大学
地球生命研究所

その一環として、人工生命(AI)や合成生物学の研究者も招くことにしたのよね。

クリスティーン・ハウザー
東京工業大学
地球生命研究所



これまでのところ、生命の起源に関する研究の歴史をまとめたんだよね。

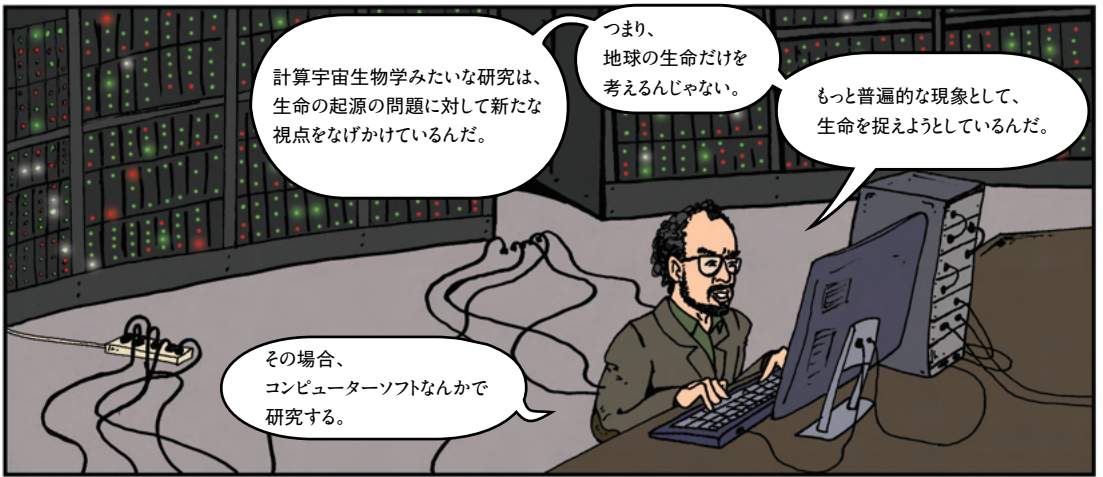
今は、地球の生命につながった出来事を再現するための証拠を探しているんだ。

地質学的な記録や生化学的証拠を探すんだ。

それよりも、今、研究室でどうやって生命をつくるか、が問題。仮想的に、でもいいんだけど。

クリス・アダム
ミシガン州立大学

でも、合成生物学では、生命が地球上でどう始まったかってことを、あまり気にしてないんだ



計算宇宙生物学みたいな研究は、
生命の起源の問題に対して新たな
視点をなげかけているんだ。

つまり、
地球の生命だけを
考えるんじゃない。

もっと普遍的な現象として、
生命を捉えようとしているんだ。

その場合、
コンピューターソフトなんかで
研究する。



合成生物学も長い研究
の歴史があるよ。

ジョン・バトラー・パークの研究まで
遡るんだ。
(文献43)

私は、半分微生物、
半分ラジウムでできた
「ラジオ菌」をつくったんだ。

1905年



生命の情報というのは、
化学や生物学から独立して
いると考えられるからね。

ある意味、生命というのは
自己複製できる情報といえる。

特に、動的で
変化しやすい情報は、
生命の重要な特性と
いえるね。

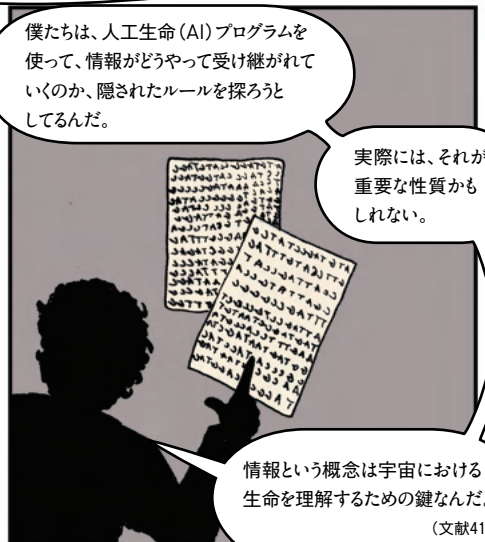


地球の条件にこだわらない
アプローチだから、地球と違う
世界で生命が生まれる可能性が
あるのかを知るのに役立つね。

ブルース・ディーマー
カリフォルニア大学
サンタクルーズ校

ポール・デイブリス
アリゾナ州立大学

DNAは、生命が再生するのに
必要な情報を複製したり、
場合によっては改変して伝達
したりするんだ。



僕たちは、人工生命(AI)プログラムを
使って、情報がどうやって受け継がれて
いくのか、隠されたルールを探ろうと
してるんだ。

実際には、それが
重要な性質かも
しれない。

情報という概念は宇宙における
生命を理解するための鍵なんだ。

(文献41)

その情報がDNA、RNA、タンパク質のどれに保存されているかというのは問題じゃないかもしれない。

もしかしたら、生命は、物質に影響を与える動的な情報に過ぎないのかもしれない。

コンピュータプログラムのようなものを使うと、未来が固定されない自由な進化が可能になるよ。

そういう場合は、情報をもっともっと複雑になっていくけど。

なんだか難しいわね

でも、こういう終わりのない複雑さが、生命と非生命の違いを理解する鍵になるのかもね。

そろそろ頭が痛くなってきた…

もしかすると、生命はまだわかっていない、ある物理学の領域のことなのかも。

やれやれ

生命っていうのは、情報に支配されて、かつ、物質に影響を与える

情報と物質の概念を統一するために、新しい物理学の法則が必要かもしれないな。

うわ、大変だ。

それとも、生命が物質の一形態だったとしたら？

うーん、だとすると、私はなにかの材料からできているわけね。

ある物質が熱力学的性質によって固体、液体、あるいは、気体になるのと同じように、

物質が生きているか生きていないかは、理論的には、それが持つ情報の性質によって判断できるのかもしれないな。

(文献41)

うう。なんだかすごいわね。



つまり、生きているということは、単に複雑な化学反応が起きているというわけではないってことね。

あるいは、生物が何か根本的に違うものなのかどうかもわからないってことだ。

(文献44)

生命の起源の研究者を今と昔で比べたら、今は、定量的科学に移行しようとしている時代だよ。
(文献44)

つまり、実際に測定したりできるとことね。

そう!でも生きているかどうかをどう測定するの?

それが肝心なところだね。



まだ答えは出てないもんね。

でも、もし生きているかどうかを測定できるんだとしたら、地球外生命を探ることの意味を考えてみて。



生命がどうやって始まるのかに関してはたくさん疑問があるよ、

それらの問題に取り組んでいる宇宙生物学者は、いろいろな専門分野から集まっているよ。

ユーリー・ミラーの実験からもう60年以上も経つんだね。もちろん、進歩しているけど、化学と生物学の間にはまだ大きなギャップがあるよね。

(文献41)

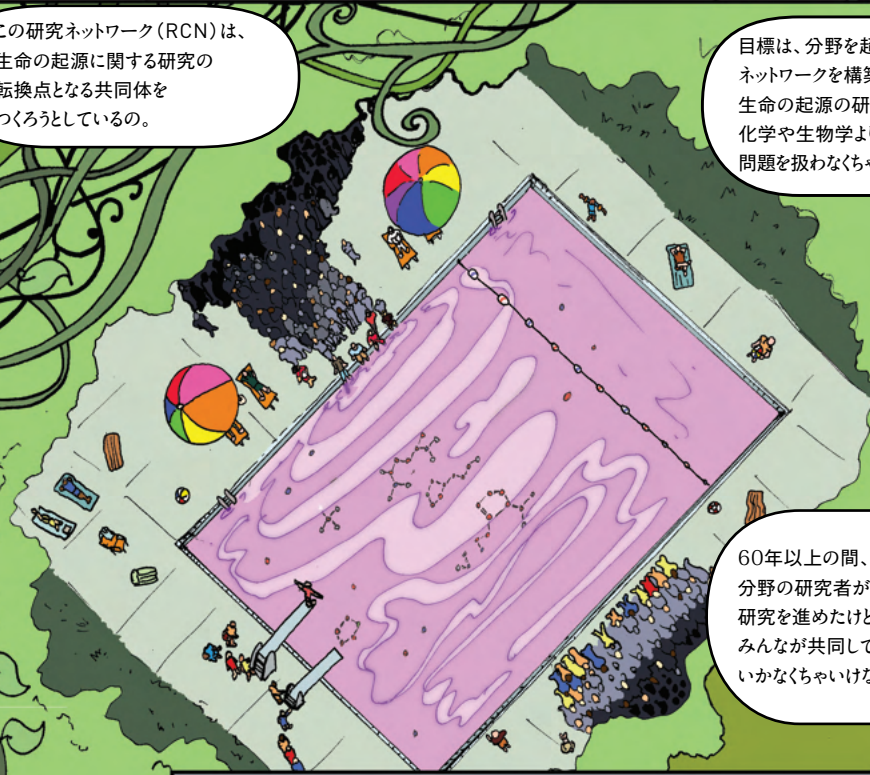
そのギャップは科学で埋めていかなくちゃね。

2018年に、NASAのアストバイオロジープログラムは、前生物的化学と初期地球環境を研究する共同体PCE³を立ち上げたのよ。



この研究ネットワーク(RCN)は、生命の起源に関する研究の転換点となる共同体をつくらうとしているの。

目標は、分野を超えた交流ネットワークを構築することなんだ。生命の起源の研究は、化学や生物学よりもっと大きな問題を扱わなくちゃいけないからね。



60年以上の間、いろいろな分野の研究者が生命の起源の研究を進めたけど、今後は、みんなが共同して研究を進めていかなくちゃいけないんだ。

みんなの知識が必要なんだ。

多分野をカバーした研究というよりは異分野間での共同研究を進める時代だね。

スムージーとフルーツサラダの違いみたいなものね



NASAというと、多くの人はロケットや宇宙飛行士、ロボットのことなどを最初に思い浮かべる。しかし、NASAは、アストロバイオロジーに取り組むことによって、研究の背後にある核心的な疑問に迫ろうとしている。

私たちは何者なのか？

いかにしてここへ辿り着いたのか？

なぜそんなことが起きたのか？

これらの大きな疑問を理解するには、非常に長い時間がかかるだろう。

答えを出そうとするなら、なおさらだ。

しかし、実験や観察の結果をひとつずつ積み上げていくことによって、私たちは答えに少しずつ近づいていけるはずだ。

Astrobiology

文献一覽

Further Resources and References cited in this issue:

1. Domagal-Goldman, SD, Wright, KE, et. al. (2016) The Astrobiology Primer v2.0. *Astrobiology*, Vol. 16, No. 8.
2. Service, RF (2015) Researchers may have solved origin-of-life conundrum. *Science*. doi:10.1126/science.aab0325
3. Miller, S. (1953) A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions. *Science*, Vol 117(3046), 528-529.
4. Lazcano, A, Bada, JL. (2003) The 1953 Stanley L. Miller experiment: fifty years of prebiotic organic chemistry. *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, Vol. 33, No. 3, 235-242.
5. Lazcano, A. (2010) Historical Development of Origins Research. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, Vol 2, No 11.
6. Schwartz, M. (2001) The life and works of Louis Pasteur. *Journal of Applied Microbiology*, Vol 91, No 4, 597-601
7. Peretó, J, et. al. (2009) Charles Darwin and the Origin of Life. *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, Vol 39, No 5, 395-406.
8. Oparin, AI. (1924) *Proiskhozhedenie zhizni*. Moscow: Mosckovskii Rabochii (reprinted and translated in Bernal JD, the origin of life. London: Weidenfeld and Nicolson, 1967)
9. Haldane, J.B.S. (1929) Origin of Life. *The Rationalist Annual*, Vol 148, 3-10.
10. Delaye, L, Lazcano, A. (2005) Prebiological evolution and the physics of the origin of life. *Physics of Life Reviews*, Vol 2, 47-64.
11. Schrodinger, E. (1944) *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge University Press, 194pp.
12. Oparin, AI, Fesenkov, VG. (1961) *Life in the Universe*. New York, Twayne Publishers.
13. *Astrobiology Magazine* (2003) Life's Working Definition: Does it Work? *Astrobiology Magazine*. Available at: <https://www.astrobio.net/origin-and-evolution-of-life/lifes-working-definition/>
14. Gaucher, EA, et. al. (2010) Deep Phylogeny—How a Tree Can Help Characterize Early Life on Earth. *Cold Springs Harbor Perspectives in Biology*, 2:a002238
15. Cooper, K. (2017) Looking for LUCA, the Last Universal Common Ancestor. Available at: <https://astrobiology.nasa.gov/news/looking-for-luca-the-last-universal-common-ancestor/>
16. Woese, C. (1998) The Universal Ancestor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Vol 95(12), 6854-6859.
17. Glansdorff, N. et al. (2008) The Last Universal Common Ancestor: emergence, constitution and genetic legacy of an elusive forerunner. *Biology Direct*, Vol. 3(29), DOI: 10.1186/1745-6150-3-29
18. Cech, TR. et al. (1981) In vitro splicing of the ribosomal RNA precursor of *Tetrahymena*: involvement of a guanosine nucleotide in the excision of the intervening sequence. *Cell* 27, 487-496.
19. Zaug, AJ and Cech, TR (1980) In vitro splicing of the ribosomal RNA precursor in nuclei of *Tetrahymena*. *Cell* 19, 331-338.
20. Kruger, K, et al. (1982) Self-splicing RNA: autoexcision and autocyclization of the ribosomal RNA intervening sequence of *Tetrahymena*. *Cell*, Vol 31(1), 147-157.

21. Szostak, JW (2012) The eightfold path to non-enzymatic RNA replication. *Journal of Systems Chemistry*, Vol. 3. DOI:10.1186/1759-2208-3-2.
22. Doherty, EA and Doudna, JA (2001) Ribozyme structures and mechanisms. *Annual Reviews of Biophysics and Biomolecular Structure*, Vol. 30, 457– 475.
23. Lilley, DMJ (2003) The origins of RNA catalysis in ribozymes. *Trends in Biochemical Science*, Vol. 28, 495–501.
24. Cleaves, HJ, et. al. (2012) Mineral-organic interfacial processes: potential roles in the origins of life. *Chemical Society Reviews*, 41(16), 5502-5525.
25. Rode, BM (1999) Peptides and the origin of life 1. *Peptides*, Vol. 20, 773–786.
26. Cairns-Smith, AG and Hartman, H, editors (1986) *Clay Minerals and the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
27. Brack, A (2006) Chapter 7.4: Clay Minerals and the Origin of Life. *Developments in Clay Science*, Vol 1, 379-391.
28. Cech, TR (1989) Exploring the New RNA World. The Nobel Prize, available at: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1989/cech-article.html
29. Petrov, AS, et. al. (2014) Evolution of the ribosome at atomic resolution. *PNAS*, Vol. 111(28), 10251-10256.
30. Bray, MS, et. al. (2018) Multiple prebiotic metal mediate translation. *PNAS*, Vol 115(48), 12164-12169.
31. Kaçar, B, et. al. (2017) Constraining the timing of the Great Oxidation Event within the RuBisCO phylogenetic tree. *Geobiology*, Vol 15(5), doi: 10.1111/gbi.12243
32. Kaçar, B, et. al. (2017) Resurrecting ancestral genes in bacteria to interpret ancient biosignatures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 375(2109).
33. Garcia, AK, and Kaçar, B (2019) How to resurrect ancestral proteins as proxies for ancient biogeochemistry. *Free Radical Biology and Medicine*, doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2019.03.033
34. Deamer, D (2006) The Role of Lipid Membranes in Life's Origin. *Life*, 7(1). 5.
35. Chen, IA, Walde, P (2010) From self-assembled vesicles to protocells. *Cold Spring Harb Perspect Biol*, 2(7). doi: 10.1101/cshperspect.a002170
36. Chen, IA and Szostak JW (2004) A kinetic study of the growth of fatty acid vesicles. *Biophysics Journal*, 87(2). 988-999.
37. Strecker, A (1850) Ueber die künstliche Bildung der Milchsäure und einen neuen, dem Glycocoll homologen Körper. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, 75 (1). 27-45.
38. Szostak, JW (2009) Origins of life: Systems chemistry on early Earth. *Nature*, 459(7244). 171-172.
39. Krishnamurthy, R (2017) Giving Rise to Life: Transition from Prebiotic Chemistry to Protobiology. *Accounts of Chemical Research*, 50(3). 455-459.
40. <https://www.wikipedia.org/>
41. Bontemps, J (2016) Seeking New Insight into Life's Origin. Available at: <https://astrobiology.nasa.gov/news/seeking-new-insight-into-lifes-origin/>
42. Scharf, C (2016) A Strategy for Origins of Life Research. Available at: <https://astrobiology.nasa.gov/news/a-strategy-for-origins-of-life-research/>
43. Campos, LA (2015) *Radium and the Secret of Life*. University of Chicago Press. 352 pp
44. Walker, SI and Davies, P (2013) The algorithmic origins of life. *Journal of the Royal Society Interface*, 10(79). doi: 10.1098/rsif.2012.0869

英語版のAstrobiology
1～7巻はこちらから



