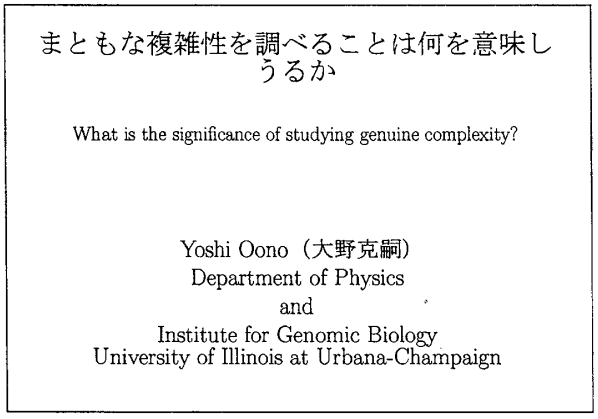
まともな複雑性を調べることは何を意味しうるか？[4]

イリノイ大学/慶応大学　大野 克嗣

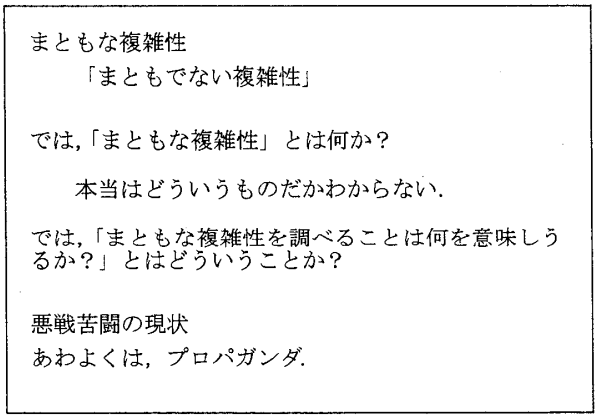
金子：それではセッションを始めたいと思います．イリノイ大学の大野克嗣さんに「まともな複雑性を調べることは何を意味しうるか？」というお話をしていただきます．

大野さんの紹介をしたほうがいいんですか？　高分子から始まって，くりこみ，カオス，非平衡，熱力学，まで，広範な領域にわたって素晴らしい業績を上げてこられています．が，今日はそうした過去の栄光の話は一切せずに，生物をどう調べるかということについて講演なさいます．

どうもありがとうございます．支離滅裂なことをやっているというふうに思われたかもしれませんけど，実際には何がユニバーサルかということだけを追求しているという感じで，そのときどきに，ユニバーサルなものを探す対象が変わってきたという…　本人としては一つのことしかやっていないつもりなのです．



[Slide 1]



[Slide 2]

[Slide 1]　お招きいただきましてありがとうございます．最初は物理の将来について語れという，非常に巨大なことを言われまして，それをできませんと素直に断ればよかったのですけれども，関心がありませんというふうに受け取られることを言いまして，坂東さんをエキサイトさせてしまったのが (運の尽きでした，今も) 坂東さんはマイクを握って，poised to attack という感じで (笑)．お手やわらかにお願いします．

[Slide 2]　「まともな複雑性」ということを言うのですから，「まともでない複雑性」ということがあるわけです．じゃあ，「まともな複雑性」とは何か．本当は正直言って，どういうものかわからない．「まともでない複雑性」でないものということ．だから「まともな複雑性」を調べるということが，何を意味しうるかというのは，まともな質問にならない．この質問がどういうことを意味するかということを，本当は問わなきゃいけない，そういう現状なのです．結局，悪戦苦闘の現状をお見せする，そしてあわよくばプロパガンダ．いままでやってきた話じゃなくて，これからの話に

[4]脚注はすべて 2007 年 12 月 11-12 日に加えた補足である．このセッションの後早川さんと食い足りないところの補足プランについてやりとりしていたが，校正刷りが (郵便の問題で) 締め切り寸前に届いたので，系統的補足は一切やめて，誤解を招く発言への補足，多少の update と，重大な訂正のみを脚注の形で加えるにとどめた．*Integrative Natural History I* という大部の講義ノートが講演者の download site http://www.rinst.org においてある．読みたい方にはこのノートのパスワードをお教えする (パスワードが付けてある理由は引用している大量の図の著作権の関係で教育用途以外に公開できないからである)．ただしこのノートは物理学者向けではまったくない．

なります．そのへんはいままでの過去に巨大な業績がある方々のお話と全然違いますので，ご容赦ください．

若い人を元気づけるか？
　　不明

生物の話になる
　　生物のソフトウェア？　ある意味では．

物理 ＝「もののことわり」の追求
　　生物学のためにやっているのでは全くない

しかし，こんなことをやっていれば哲学になってしまうのではないか？
　　それをいかに避けるかがカギ．

[Slide 3]

そこで，話の流れは.....

(1) 複雑系 Complex system とは何でないか？
(2) 複雑系の典型例をみよう．
(3) 物理は何をしてこなかったか？

ここまでが反省．

ここまで来ると
　　何をしなくてはいけないか，
　　自ずと方向が見えてくる．(？)

[Slide 4]

[Slide 3]　(これからの話が) 若い人を元気づけるか？これは不明です．生物をやりたいという学生はいっぱいいるのですが，私はもう，岸に沿って泳ぐのはやめたから，ついてくるな，向こう岸があるかどうかもわからないと言っています．何も出なくてもいいと思っているわけです．

生物の話になるのですが，生物の，ある意味で南部先生が聞かれたというソフトウェアの話と関係しています．昨日でしたか，田中先生に先取りされてしまいましたけれども，物理とは，もののことわりの追求だから，ここで生物をやりますけれども，生物のためにやっているのではない．じゃあ，ソフトウェアで生物のためにやっていないとなると，これは哲学になるんじゃないかと．実際，その危険性はかなりありまして，それをいかに避けるかというのが，今後への鍵です．

[Slide 4]　そこで話の流れとしましては，最初に複雑系と一般に言われているものが何であって，それがいかに誤解されたものであるかということを見ます．その次に複雑系の典型例を考え，そしてついで基礎物理がいままでしてこなかったことを，もう少し意識的に取り上げることに，今後はなるんじゃないか，という話になります．今後のわれわれの方向が何であるかということです．

1. 複雑系 Complex System とは何でないか？

どんなものが複雑系と見なされてきたか？
解説書はなんと書くか？

例: 米沢「複雑系を科学する」(岩波書店)
　複雑な現象の例:
　　地震，気象，市場，生命系，複雑液体
　どういうことが論じられているか？
　　カオス，フラクタル，散逸構造，自己組織化，創発性....

ここ見られる共通の誤解のタネは何か？

[Slide 5]

カオス，フラクタル，散逸構造，自己組織化，創発性...

共通のことは
　「なにやらややこしげなことが自発的に生じる」
　「要素を一々いじらないでも生じる」
ということだ．

特に何もしないで誰にでも作れるのは簡単なしるしではないか？
　「自己組織化するのは簡単だからだ．」

上記諸概念は irrelevant である．

[Slide 6]

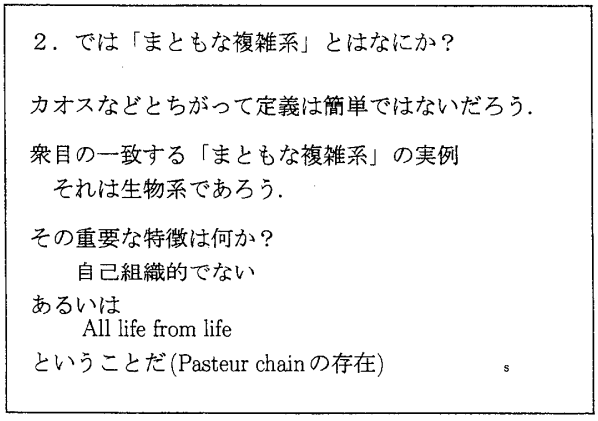
[Slide 5]　まず最初に，Complex System とは「何か」という質問には答えられませんので，「何でないか」という質問に答えます．どんなものが複雑系として見なされてきたかというと，一般的な解説書から取るほうがいいと思いますので，物理学会に敬意を表しまして，前会長の書かれた『複雑系を科学する』という本を．

早川 :前会長じゃないよ．

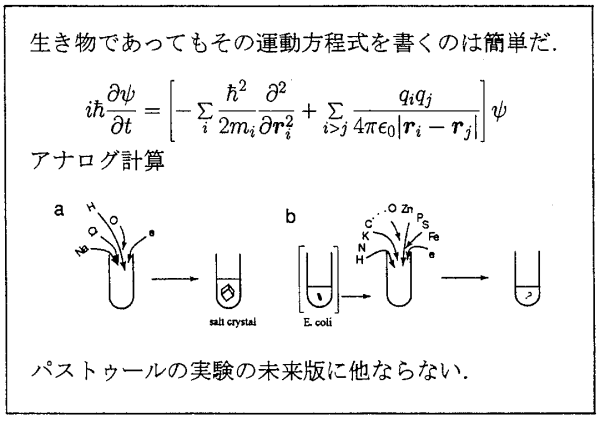
大野 :え？
早川 :前はそこにいらっしゃいますので.
大野 :いや,「前（ぜん）」じゃない.「前の」です．すみません．要するに前に会長をされたことのある方の書かれた本.

複雑な現象の例として何が挙げられているか．地震，気象，市場，生命系，複雑液体，いろいろなことが挙げられています．挙げられているもののなかには，本物から偽物まで，オールバラエティが入って，それはいいのですが，どういうことが論じられているかといいますと，カオス，フラクタル，散逸構造，自己組織化，創発性，こういうふうになっている.

[Slide 6] ここには，私の立場から見ると共通の誤解がある．共通の誤解の種というのは，何やらややこしげなことがですね，自発的に生じる，いちいちいじらなくても，とにかく何か変なことが生じるということです．だけども何やらややこしくても，自発的に何もしないで生じるということは，つまり何もしないで誰にでもできるということなのですから，それは簡単ということじゃないか．ということは，こういう概念というのは，全部 irrelevant なのではないかということになるわけです.



[Slide 7]



[Slide 8]

[Slide 7] では，まともな複雑系とは何かと開き直られると困るのです．カオスなんかと違って，定義は簡単でないでしょうから，実例でいきましょう．衆目の一致する「まともな複雑系」は生物系でしょう．そういう意味で生物系が出てきます．いまのところ生物系が複雑系でないと言っている人はあまりいないと思います.

その重要な特徴は，みなさんにもお母さんやお父さんがおられるということです．つまり自己組織的でない．あるいはそこに書いてあるように，要するに Pasteur が言ったように，連鎖があって，とにかく生命というのは生命からしか出てこない．それが非常に重要なことだ.

[Slide 8] 生き物だって何だって，とにかくその運動方程式を書くのは簡単です．High energy は関わりませんから，Coulomb force でよろしい．それに核でもそんなに重いものはありませんから，相対論的なことは考えなくてもいい．結局，ここにあるように，食塩水，これは飽和食塩水のつもりなんですけど，飽和食塩水だろうが，大腸菌が 1 匹，1 個体入っている水滴だろうが，この方程式を書くのは簡単です．たくさん書かなきゃいけないから大変ですけれども，元素分析さえすればいい．要するにどれぐらいの，どういう原子核が何個あるか，電子が何個あるかということがわかればそういうものをデュアびんの中に入れて，エネルギーを設定して，境界条件は homogeneous Dirichlet condition でいいのです．で，この中に入れて放っておいて何が起こるか.

するとこの場合（左図）は，たいがいこういうことが起こります．この場合（右図）は 1 年間待っても何も起こらないと思います．これは Pasteur の実験の未来版です．もっと簡単に言えば，

これ（右図）をぐちゃぐちゃに，ミキサーにかけるというか，超音波か何かをかけて破壊して，元に戻るかと，よみがえりが起こるかという実験ですね．そういうことは，絶対に起こらない．

どこがちがうのか？

どのくらい初期条件が大事かという点がちがう．

考えてみると，自発的に生じるとは:
⇒ 系に生じることは事実上変えようがない
⇒ 系は複雑化すべくもない．

平衡統計力学がうまくいくのは初期条件の選択がどうでもいいからだ．

[Slide 9]

結晶 vs. 大腸菌

複雑系とそうでない系の本質的差:

基本的法則以外に要求される補助条件に
「詳細がどのくらいなくてよいか」にではなく，
(自己組織系の特徴付け)
「詳細がどのくらいなくてはいけないか」にある．

複雑な系のおおよその特徴付けとして

基本的法則以外に要求される多量の補助条件

を採用する．

[Slide 10]

[Slide 9] これらを比べると，何が違うかというのは，かなり自明だと思います，どのくらい初期条件が大事かということなのです．

考えてみると，何かが自発的に生じてしまうと，それをコントロールして何かほかに持っていくということはできません．要するに，初期条件のなかのある性質を結果に反映してくれるためには，自発性があまり大きいものでは困るわけです．よくご存じの平衡統計力学がうまくいくというのは，初期条件の選択がどうでもいいからです．

[Slide 10] 結局，複雑系とそうでない系の本質的な差というのは，ここに書いてあるように，基礎的法則以外に要求される補助条件に，詳細がどのくらいなくてはいけないかということです．自己組織性というのは重要だと言われていましたけれども，それはある意味あとで言うように重要なのですけれども，通常のとらえ方では何かノントリビアルなものが自発的に生じる，どのぐらい初期条件がなくてもいいかというほうに目がいっているわけです．それはちょっと的が外れている．

おおよその working definition といたしまして，複雑系というのは基本的法則以外に要求される多量の補助条件がいる系であるということを採用する[5]．

初期条件の課しがいがあるためには
複雑系は記憶装置でなくてはならない．
Prototype: 結晶軸の方向，結晶の位置

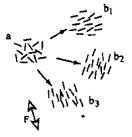
自発性の欠如が「複雑系」に必須．
とはいっても無秩序ではなく，適当な欠如がいる．

これはどうして生じるか?
対称性の低下の可能性による．

この意味で「自発的組織化」は重要ではある．

[Slide 11]

流行の言葉で言えば「結晶軸の方向」は創発的な性質．



「創発的」という言葉が複雑系のキーワードとして使われてきたのは正しい．

しかし，理由はまちがっていた．
「詳細がないにもかかわらず何かが創成される」からでなく
「未定の(slowな)自由度」が出来るところがカギ．
cf. 金子「生命とは何か」　history

[Slide 12]

[Slide 11] もちろん私がこう言うと，たちどころに反論がありまして，例えば気候などというのはどうしてくれる．昨日のお話でしたか，気候系が，要するに地球の流体力学系が一番複雑な系で

[5]Working definition といったが論理的でない．「複雑系」を定義するのはあまりに野心的すぎるので，必要条件しか考えていないのである．重要な必要条件が「補助条件の枢要さ」である．そこで「複雑系」が研究したければ「補助条件の枢要さ」のないものを相手にするのはやめよう，ということ．

あるというようなお話が出てきました．けれども，ただ補助条件がややこしければいいという問題ではない．要するに系が大きければ，補助条件がたくさんいるのは当然です[6]．

だからここで日本語では「複雑」と簡単にまとめてしまいますけれども，complex と complication は区別してもらわなければ困る．「complexity」というときには，何か構造があるとか意味があるとか，そういうものを意味しているわけです．例えば「complex number」というときには，これはガウスが名前を付けたのですけれども，「なんだかわけのわからない数字」という意味で「complex number」と言ったわけではない．それに対して「complication」というほうは，例えば「complication about pneumonia」か何かで，「肺炎をこじらせて死んだ」とか，そういうときに使う言葉ですから，ちょっと違います．

つまり補助条件が多ければいいというものではなくて，ある程度，構造化していなければいけない．だから構造化した補助条件を持ったものがなきゃいけないということなのです[7]．

そういうような初期条件みたいな補助条件に，「課しがい」がないといけません．例えば平衡系にそんな条件をいくら課したって，大腸菌は出てこない．極端な言い方をすると，ここに書いてあるように，私がいま言っている複雑系というのは，ある種の記憶装置なのです．記憶装置という意味では，さっき食塩水のほうはつまらない系だと言いましたけど，中に浮かんでいる結晶の方位軸，軸の方位，それから結晶の位置なんていうのは，ある意味では記憶装置です．

要するに，自発性の欠如した部分が必要で，こういう結晶軸とか何とかは初期条件で決まっているわけですね．絶対に Hamiltonian で決まっているわけではない．結局，対称性の低下というのが重要，つまり対称性を低下させるためには，自発的組織化がそういう意味では重要なのです．

[Slide 12] ここで少し言い直しますと，結晶軸の方向などというのは，もともとの Hamiltonian にはない性質ですね．もともとの系にはなかった emergent property．例えばこれはあまり結晶のように見えませんけど，そもそもは液晶の説明に使った図を流用しているもので，いずれにせよ物性の symmetry breaking が起こって，外場をかけるとこっちになる．つまり，いったんこうなると外場ははずしてもいいですから，そういう意味で記憶装置みたいなことはあるわけです．

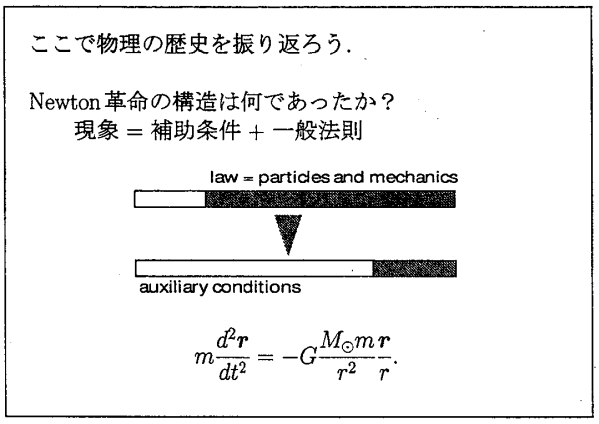
「創発的」という言葉もまたいわゆる複雑系のキーワードとして使われてきました．一般には何か意味のあるものがわけのわからないところから出てくるというほうを強調するのですけれども，重要なことは，symmetry breaking が起こって，未定の部分が出ますね，つまり南部・ゴールドストンモードをになう方です，連続なものだったら，そういう，未定の自由度ができるっていうほうが大事だ．例えば金子邦彦さんは，『生命とは何か』という本のなかで，これが重要ということを言っていますね．

[Slide 13] ここで基礎物理の歴史を振り返りましょう．Newton 革命の構造は何であったかというと，ある現象，Newton の場合は天体現象というか， solar system の現象だったわけですが，それを初期条件と一般法則に分けたのですね．で，こういう法則を書いた．そのあとの基礎物理の歴史というものを見ると，この太陽の性質がどういうふうに決まってきたかというのをもっと基礎的なところから見ようとか，それからもちろん重力というものをもっと基礎的なところから見ようというふうに，contingent な部分を減らす努力の歴史です．たとえば，さっきの佐藤先生のお話であったように，symmetry breaking の歴史ではまさに evolution の結果としてこういうことが出てきた．(具体的諸力は) 基礎理論そのものじゃなく，基礎理論プラス contingency(というか補助条件みたいなもの) から出てきた．基礎理論というのは，もちろん contingency のほうじゃなくて，統一場理論みたいなもの，つまりこの部分ですね．これが全現象です．それを補助条件と一般法則に分離して，この frontier をどんどんこっちにというか，補助条件のほうをどんどん増やす方向に，こ

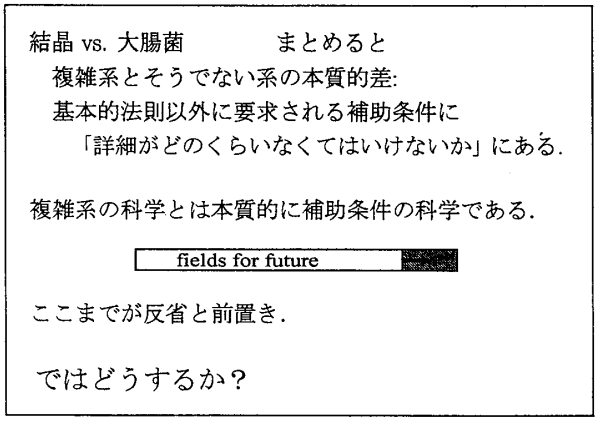
[6]補助条件の量が示量的な系は複雑系としてはおもしろくない．

[7]ここに見るように「複雑系」を特徴づけて一応対象を囲い込もうとはしているが，そううまくいってない．誰もがそうと認める複雑系の実例，生物系，があればいいので，うまくいかなくてもまったく構わない．

ちら (黒い方) を煮詰める方向に来た．こちらを煮詰めると必然的にこっち側 (白い方) が増えます．



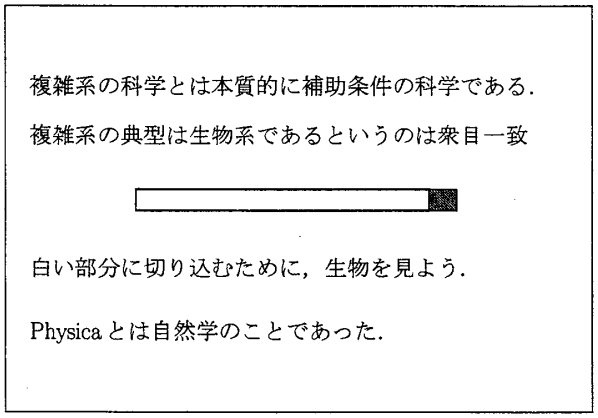
[Slide 13]



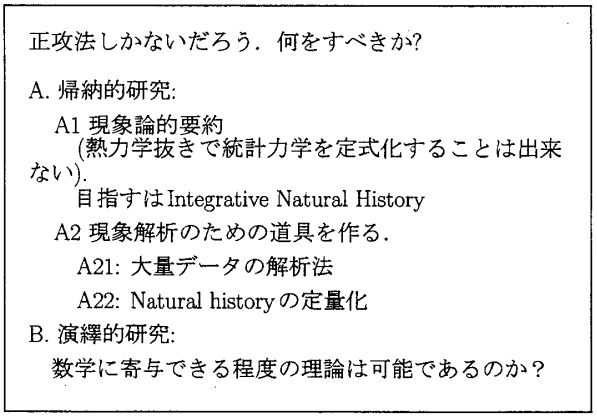
[Slide 14]

[Slide 14] だから，ここ (境目) が，もちろんどんどん右にいって，最後に theory of everything というのが出てくる，それはそれで喜ばしいことなんですけれども，今度はこちら側 (白い側) に，やっぱりなんか広大なものが出る．ここはわけがわからない部分で，歴史と偶然で決まっていて，もうどうしようもないところである，ということなのですが，本当にそうなんだろうか．

結局，複雑系とそうでない系のちがいの本質というのは，ここ (白い側) がどれだけ重要かということなんだから，基本的な法則以外に要求される補助条件を調べることから，何か出てこないか．ここまでが反省とまえおき部分です．



[Slide 15]



[Slide 16]

[Slide 15] くりかえしますけど，要するに複雑系の典型は生物系であるということは，衆目一致しているのですから，ここ (図の白い側) を理解しようと思ったら，例として生物を見よ，つまりここに切り込むために生物を見よう．「Physica」というのは，もともと「自然学」でしたから，そういう意味で初心に帰れるのではないか．じゃあどうするか．で，たいへん困るわけです．

[Slide 16] で，正攻法しかないだろうと．それで何をすべきか．

要するに帰納的な部分と演繹的な部分があって，現象論的な要約というのがないと，基礎理論さえできない．例えば統計力学を見たらわかるとおり，熱力学抜きでは一切定式化できませんから，結局，熱力学は統計力学で正当化されるものではまったくないのです．

そういうことからわかるように，現象論というのは非常に重要で，現象論をきちんとまとめる必要があるだろう．それはある意味では，ここにスローガンは書いていますけれども，Integrative Natural History.「Natural History」は普通の，極端に言えば「虫集め」と思っていただいてけっこうです.「Integrative」というのは，要するに分子のレベルから巨大なレベルまで，全レベルを統

合してという意味．それから「Mathematical」というのは，なるべくそれを明確な言葉で述べようということです．

このためには一所懸命，実際の現象を見なければいけない．見るための道具をつくるというのが，ここです．こちらは生物のことをものすごく調べなきゃいけないという非常にたいへんな部分で，あんまり生物を好きでない人にはやりやすいところではないと思いますが，ここは物理屋の大いに参加できるところではないかと思います．

もちろん帰納的研究だけやっていてはだめで，現象論的に出したいろいろな事実をまとめたあとで，それをちゃんと定式化して，例えば統計力学みたいのができれば，それはうれしいですけれども，少なくとも熱力学的な現象論ができるといい (前途を楽観しているという意味ではありませんが)．少なくともなんか，生物で，数学の理論として，数学に寄与できる程度の理論が可能にならないかというのが，ここです．そういうと，数理生物があるじゃないかと言われますけれども，数理生物はやっぱり数学を使っている分野ではありますが，数学にインパクトを与えているというふうには，あんまりまだ言えません．

構成的研究(金子さんら)もある．

A. 帰納的研究:

A1. 現象論

Indeed facts are elusive and you usually have to know what you are looking for before you can find one. [G. G. Simpson, The meaning of evolution (Yale UP, 1967) p272]

なにを見るか的をしぼらなくてはならない．

[Slide 17]

(0) 補助条件とは何か？ 条件の分類

時空境界条件である．(放物的である)

境界条件: 環境(物理的，生物的 ← 生態学)

初期条件: ≃ 遺伝情報

DNAに書き込まれている情報

Epigenetic な情報

構造的情報

最終的にはすべて空間配置で決まる．

Cell as a scaffold

[Slide 18]

[Slide 17] 例えば帰納的な研究っていうには，もう少し active にやるという方法があります．それは金子さんたちが精力的にやっている構成的な研究なのですが，私はどちらかというと，ぼおっと眺めてというか，生きている動物やら花をただ見ているほうが好きなもので，あんまりそういう能動的なことはやらないで，とにかく帰納に徹しよう．

帰納帰納といっても，それは簡単じゃなくて，ここに引用したように，G.G.Simpson は有名な進化生物学者ですけど，その人がその進化の意味についての本の，ほとんど冒頭で，こういうことを言っています．要するに，事実というのは捉えにくいものだと．だから何か知りたいものをあらかじめ知っていなければ，それを知ることはできないということです．だから，何を見るか，的を絞らなければいけない．

[Slide 18,19] 「的」は補助条件です[8]．もちろん補助条件とは何か．どういうものがあるかとか，そういう問題があります．もう少し具体的な問題としては，補助条件がどういう構成を持っているか．例えば補助条件というのは，初期条件というと，生物だと普通だったら遺伝情報だと思われるでしょうけど，遺伝情報といっても，DNA に書かれているもの以外に，膨大な量の細胞の構造とか[9]，そういうものがあるわけです．そういうものがどう構成されているかということを知るというのは大事です．しかし，これがどう使われるかがわからないと，あまりよくわかりませんから次

[8]補助条件なら何でも大事であるはずもない．そこで，系の重要な特性を再現するのに不可欠な条件のみを相手にする．これを基本条件 (fundamental conditions) と呼んでいる．いくら生き物でも各原子の位置の指定の必要なわけがない．

[9]構造的基本条件; そのほかに「指示的」基本条件というものがある．

の問題は:

どう使われるか．これにはいろいろな時間スケールがあります．一人一人というか，オーガニズム一つ一つの個体レベルの時間スケール，それから時々刻々，例えばみなさんの脳の中のメッセンジャーRNAは刻々濃度を変えています．変えることで記憶とか何かが全部担われているわけです．そういうレベルの，行動なんかを支配している条件変化．

(1) 補助条件は如何なる構成を持っているか
　—遺伝情報の組織構成
　これはどう使われるかがわからないとわからない．
(2) 補助条件が如何に使われるか
　発生，変態，老化—個体の時間スケール
　時々刻々—sec to min.　行動など．
(3) 補助条件は如何に変化してきたか
　歴史—古生物学と進化
　結果としての多様性—分類学，種分化
　集団効果—生態，社会

[Slide 19]

標準的生物の教科書を見渡すと，欠落している部分は:
1. 生化学と生物物理
2. 生理学，代謝，

要するに物質に直結した部分．

生物学の研究には
　素材の自発組織能に力点を置いた研究
　その不定性と制御可能性に力点を置いた研究．

生物物理は前者に力点を置く．

しかし，一般システム理論のようなふうにはなりたくない．

[Slide 20]

それからもちろん補助条件自体がどういうふうに変化してきたか．それは地質学的時間のスケールです．そういうものを見て，何か通則があるか，そういうことを見抜くということをまずやらなくちゃいけない[10]．

[Slide 20] いま,「何を見るか」ということを言いました．標準的な生物の初等教科書[11]を見渡すと，その「何を見るか」の中に，重要なことが欠落していることがわかります．それは生化学と生物物理とそれから生理学と代謝という，要するに「物」に直結した部分が完全に欠落しています．これを本当に欠落させるのがいいことかどうかは問題です．例えばDNAが鎖であるということを無視するのは，もちろんよくないのですけれども，そんなにdetailに踏み込むことはない．私は例えば分子モーターがどう動くかというのを，物理の問題としては研究していますけれども，それは生物の問題だとは思っていません．それは生物にとっては，何かものを運んでくれる道具が必要だということはわかります．だけどそれがあればいいので，どうやって運ぼうと，いまさら知ったことではない．つまり社会の仕組みを知るのに，例えば物流を知るのは大事です．だけども，一台一台のトラックの運転とかトラックの機構がどうなっているかというところを知る必要は，必ずしもないですね．そういうレベルの研究と，ここで言っているような生物の研究というのは，かなり直交しているに近い．

生物の研究というのは，自発的組織能に力点を置いた研究と，そうでない研究がありますけれども，生物物理というのは，どちらかというと死体からでも供給が仰げるようなものしか研究しない．挽肉の物理だと悪口を言って，非常に嫌われているのですけれども，そういうことです．

では,「物」に頼らないとなると，今度は歯止めがなくなって，おそらくナンセンスというか一般システム理論のようになる．これはどうしてそうなっちゃったかというと，実際の生物を眺めなかったからだと思うので,「物」にいかないでしかも哲学とか一般的な，おそらくナンセンスに近いような一般理論にならないためには，ものを見るしかない．

[10] こういうことはすでにやられているのではないか．講演者は寡聞にして知らない．もちろん諸大家 (Mayr, Wilson, Bonner, Maynard-Smith, Gould, などなど) のかなり一般的な考察はあるが，多くの重要な知見が今世紀になってはじめてえられていることと，多くの生物学者には数理的意識が欠如しているこの二点のためであろう．

[11] たとえば，D. Sadava, H. C. Heller, G. H. Orians, W. K. Purves and D. M. Hillis, *Life: The Science of Biology* (W. H. Freeman, 2006)．現状では，日本語の教科書で生物の基礎を勉強する意味はまったくない．

遺伝情報は自発的組織能の低下した系をガイドする「指示」として出現した.

精緻な指示が出来る方が有利
⇒ 設計図的な面さえ帯びてきた.

その本質はあくまで，対称性低下系での補助条件である.

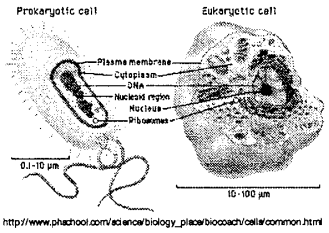
複雑化が生じた場合その補助条件は必然的に歴史の産物.

進化する系の複雑化は必然ではない. cf. 原核生物

生物複雑性の研究は真核生物の研究である.

[Slide 21]

生物複雑性の研究は真核生物の研究である.



DNA ～ 1mm vs ～ 1m

[Slide 22]

[Slide 21] これはついでの話なのですけれども，いまおわかりのように，遺伝子というものは，自発的組織のために対称性が低下したときどっちにいくかというのを指示するような情報として，最初は出てきて，それがどんどん発達していったようなものだ．要するに遺伝子というのは，当然ながら設計図ではない．設計図という面は，ありますけれども，設計図ではない．指示なのです．ここに書いてあるように，本質は対称性低下系での補助条件だ．そうすると補助条件というのはどんどん複雑化していったわけで，それは歴史の産物である．

だけれども，あとで出てきますけれども，進化すれば複雑化するかというと，話はそんなに単純じゃない．生物には原核生物と真核生物とがありますが，この中で生物の複雑性の研究というのは，真核生物の研究である．

[Slide 22] ここで生物複雑性の研究は真核生物の研究であると言いましたけれども，あまりぴんとこないと思いますので，非常に初歩的な話を足します．生物全体は，本当は，あとでもう少し詳しく言いますけれども，真核生物と原核生物からなる．要するにこういう核を中に持たない細胞でできた生物と，核を中に持った細胞でできた生物，これ（図の右側）を真核生物，こちら（図の左側）を原核生物というわけです．細胞の大きさがまず違うのです.（原核生物の細胞は）だいたい代表的には 1μm ぐらいの大きさです．こちら（真核生物）は 10μm か，それより大きいくらいのものです．

それから遺伝情報の一部を担っている DNA というものの長さがやっぱり極端に違います．こっち（原核生物）はだいたい 1mm ぐらいだけれども，こっち（真核生物）は 1m のオーダーだ．

さて.....
Biophile であるならば「切手収集の detail」もよろこびなのだが.
それを感じない人は生物をやるべきではないのでは.....

現象論的のさわり
複雑性はいかに増大してきたか?
主要な経路はいくつあるか？

基本的には一つしかないようだ.
(0) 一般的な「舞台」の創出
(1) 舞台の拡張
(2) 拡張された舞台での対称性の低下

[Slide 23]

(0) 一般的な「舞台となりうるもの」の創出

たとえば
真核生物の発生: 0.03 PAL (1.6GaBP)
多細胞生物の発生: 0.05 PAL (ca 1.0GaBP)
外骨格: 0.1PAL (0.6GaBP)

空気中の酸素分圧と大きな変化が符合しているらしい.

環境さえ整えば出現する?

[Slide 24]

[Slide 23] 現象論のさわりをやらなくちゃいけない．物理の人で，Rutherford ですか，物理以外はみんな切手収集だと言った方がいます．虫集めなんていうのは切手収集みたいなものです．だけ

れども生物をやる人というのは，やっぱり切手収集に喜びを感じないと，やっていられないでしょう．切手収集をやったあげく，膨大な切手を集めて，その裏に何があるか，あんまりそこまでいかないで満足する人がいることは事実ですが，われわれ，物理屋とか数学者で，切手収集じゃないですけど，虫集めを一所懸命やっている人はいますが，そういう人たちはやっぱり，裏に何かあるんじゃないかと思ってやっているわけです[12]．

だから複雑性がいかに増大してきたか，まとめられるかどうか．これはまだ tentative なまとめですけれども，要するに経路は一つしかないみたいだ．最初に何か，複雑化も全然しようもないような，どうしようもないものがあります．それからある程度のことはできる stage ができる．で，それが第 0 段階ですね．で，この stage が広がる．広げる方法には二つあります．自前で用意するか，他人のところから持ってくるかと，二つあります．そのあとで，この間で symmetry breaking が起こる．この場合はもちろんほかから持ってくるのですから，最初から対称性がないのですが，この差がもっと enhance されるということです．だいたいこういうことが代表的なのではないか[13]．

[Slide 24] で，抽象論をやってもしようがないですから，具体的な話をしますと，例えばさっき言った真核生物発生というのは，まさに細胞の中に何かが共生する話なのですね[14]．でまあ，ここは舞台をつくる．舞台となりうるものの創出は，どういうときに起こったかというと，例えば真核生物の発生というものは，16 億年前だと．多細胞生物が生まれるのは 10 億年かそれぐらい昔に発生だった．

ある説によると，かなりみんな信じているみたいですが，こういうふうな発生と空気中の酸素レベルの関係ですね，PAL は Present Atmospheric Level，現在のレベルの 3 パーセントぐらいのところで真核生物が可能になった，5 パーセントになったら多細胞生物が可能になった，そういうことを言っているわけです．環境が整えば出現するみたいに見えます．要するに何をやっているかというと，いつもこういうものをつくろうとしている．やろうとするのはある種のゆらぎでできるのですが，それが環境が整わないとだめになる．環境が整うよりは，しょっちゅういつもやっているのです．だから環境が整うと，こういうものが出るようになるように見える[15]．

---

[12] もちろん，集めるだけでも楽しいけれど，やっぱり商売っけは首を持ち上げるでしょう．

[13] **重大な補注．** 2007 年のはじめくらいまでは [Slide 23] にある (2) で終わりだと S. Ohno 氏のように考えていたが，実は本当に重要な段階はその後にある，ということにその後で気がついた．「対称性の低下で生成されたいろいろなものを統合して使いこなす段階」こそが真の複雑化を引き起こすステップだと考えられる．遺伝子重複やそのあとの subfunctionalization, neofunctionalization などの対称性低下で量的には進歩があるが，粗いたとえをすると，可算から非可算に移るような質的変化はここにはない．統合の後ではじめて新境地が開けると考えなくてはならない．この考えを支える重要な例は，襟鞭毛虫 (Choanoflagellata) が多細胞生物を作るのに必要ないろいろな遺伝子をすでに持っていること，あるいは Bilateria(たいていのまともな動物) のような体制を作るに必要なシグナル分子や Hox 遺伝子が刺胞動物にかなりあることなどである (海綿動物にもすでにあったといわれている)．一般的疑問は「何でこんな連中が '高等な' 遺伝子をたいして使えもしないくせにいっぱい持っているんだ」というものだ．もちろん使ってはいるが本当は有機的にもっと使いこなせるということであり，多細胞生物への飛躍，きちんとした体制を持った動物へのイソギンチャクレベルからの飛躍などはその核心が「使いこなし」にあるといわなくてはいけない．この目でみると，ほかにもいろいろとそういう例が見えてくる．たとえばわれわれの言語能力もそれを支えるほとんどすべての能力はいろいろな哺乳類に広く行き渡っている．われわれだけがそれを統合しえたと言うことだ．もちろんこの統合がレベルの違った複雑性を生み出した．細胞内共生によっていろいろな真核生物群が作られているが，これも共生から真の細胞内器官へと変わることが重要なステップでこれも「統合」による新たな飛躍の例と見るべきであろう．

要するに，複雑化の単位過程は二つのステップからなる．第一のステップは本質的に重複，第二のステップは統合である．今まで第一のステップが重視されてきたがこれは舞台を用意する段階で複雑化の本質的に重要な部分ではないというべきである．第二のステップこそが真に複雑性に飛躍をもたらす．この部分のメカニズムにユニバーサルなものがあるか，あまりまじめに考えられていないように見える．

[14] 正確に言うと好気性の真核生物の発生についての話．ミトコンドリアを持たなかった真核生物の起源はたぶん生命の起源くらいに古い．もちろん，ここでいう「ミトコンドリアを持たなかった真核生物」は Excavata の中のかなり低酸素状態で生きる二次的にそうなった (かってミトコンドリアがないと誤解されていた) 連中とは全く関係ないので誤解なきよう．

[15] おしまいに出てくる宮田さんの質問に関することだが，酸素レベルがある段階にくると，新たな体制が有利になって選択で生き残るようになるということ．

(1) 舞台の拡張

複雑化するには舞台は広くないといけない．
広くする方法は２つある．
外からもってくる—他との共働
自前で用意する—重複

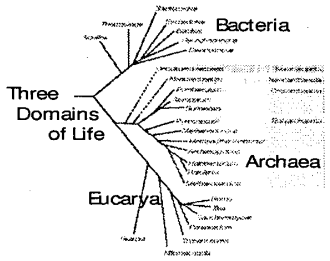
(2) 拡張された舞台での対称性の低下

分業，共生，subfunctionalization, etc.

「少しずついろいろ集めて次第に複雑化する」???

[Slide 25]

複雑化の前提としての共生
＊新たな超高次分類群の発生
真核生物の発生: ミトコンドリア



[Slide 26]

[Slide 25] 舞台の拡張には，さっき言いましたように，ほかと一緒に何かをやるというのと，自前でやるのと二つある．で，そのあとで拡張された舞台の上で，例えば共生とか分業とか，subfuctionalization，要するにもとあった機能が，二つの違う機能に分化するというものです．どうもあんまり重要なところで，少しずついろいろなものを，ちょっとずつ部品を買ってきて集めて，だんだん複雑になっていくということはないみたいです．

[Slide 26] 抽象論ではいけませんので，最初の共生による超高次分類群の発生．いまさっき，原核生物と真核生物と言いましたけれども，そういう分類をすると普通は怒られるのです，原核生物というのは存在しない，実は Bacteria と Archaea という二つなんだと．この二つのグループは，核を持ちません．「Eucarya」と書いてある，これが真核生物です．この三つを「Domain」というのです．日本語で何と訳すんですかね．「領域」というんですか．

Eucarya は，結局，ミトコンドリアが共生するということでできたと思われます[16]．われわれは，ここにいますね，トウモロコシがここでコウボがこれで，ゾウリムシがこれです．われわれが非常に違っていると思っている生きものがこのへんに，こっち（Bacteria）は大腸菌がここにいて，他の細菌がここにいると，そういう話です．

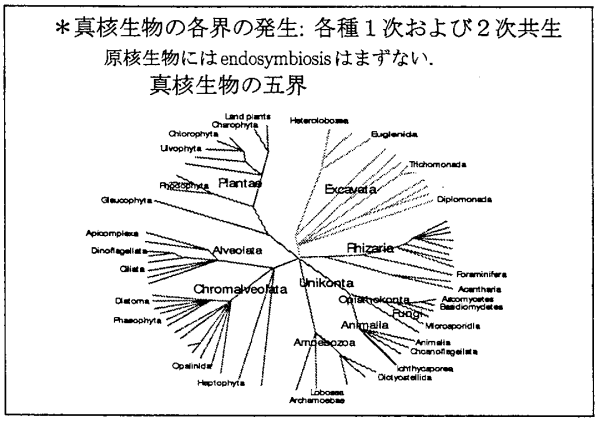
だから，非常に重要な，要するに複雑化しているのはこれ（Eucarya）だけです．これをつくるためには共生が必須である．つまり大きな細胞をつくるためには，共生が必須であるわけです．

[Slide 27] それから今度は真核生物が，これはこの 1，2 年の話ですけれども，かなり明確に五つの部分に分かれるということがわかった．それもやっぱり (かなり重要なカギが) 共生なんですね[17]．

昔，みなさんが高校で習った生物学だったら，多分，動物界と植物界ですか，それでキノコとかなんかそういうものは，全部植物に入るとかなんとか，そういう話だったと思うんですけれども，いまの分類だと，動物がここ（Animalia）にいまして，キノコがここ (Fungi) にいまして，われわれとキノコは非常に近い．植物はここ（Plantae）にいるんですね．ここ（Chromalveolata）がコンブとか何かの仲間です．これ (Excavata) がミドリムシとか何か，そういう．これは一番わけのわからない生物ですね．これ（Rhizaria）は放散虫とか何とか，そういうやつです．

[16] もちろん，その共生が生じる前の段階の嫌気的な Eucarya が heterotrophic raptor としていたと考えられているが，グループとしての飛躍はここにはじまる．

[17] 正確に言うと，鞭毛が一本のグループ Unikonta と二本のグループ Bikonta があり，前者はわれわれやキノコやアメーバを含んでよくまとまっている (ミトコンドリア以外の細胞内共生なし)．後者は，基本的にミトコンドリア以外の細胞内共生のないグループ (Excavata)，一次共生の結果として葉緑体を持つに至ったグループ (Plantae) と二次共生によって光合成をするに至ったグループ (Chlomalveolata) にわかれる．以下に出てくる坂東さんの質問への答えとして，鞭毛の数と共生のやり方が大分類と整合している，といえる．



[Slide 27]

新たなニッチの開発—生態系の複雑化
生物の陸上への進出
＊カンブリア紀以前の地衣類の進出.
＊菌類との共生による陸上植物(land plant)の地上進出.

＊被子植物と鞘翅目の共進化
＊cryptic herbivoryによるアリの林冠進出
＊腸内細菌と各種動物

大絶滅以外の大事件はだいたい共生による.
生物間相互作用がカギを握る.
農耕の発生 ⇒ メタンなどの温暖化ガスの発生を加速,
氷河期を無期延期

[Slide 28]

この図で重要なことは，ここで二次共生っていっていますけど，植物が葉緑体を共生，藍藻の共生で得たというのは知られています．それは１次共生というやつです．そうじゃなくて，これ（Rhodophyta）は紅藻です．テングサとかアサクサノリとかいう，赤い藻の，海草の仲間です．こいつの単細胞のやつを飲み込んだやつがこれ（Chromalveolata）になっているのです．それは二次共生．ほかの有名な例では，何か別の緑藻，緑色の藻，ここにいますけれども，こいつを飲み込んだとか，要するにそういう,「またまた共生」みたいなもの．

ここ（図の中心）でまさにビッグバンなんですね．これはここにどおんと出てきて，どれが最初に出てきたか，少なくともいま，ぱっと見てわかるようにはできないのですけれども，要するに五つの大きな分類が，うわっと最初に出る．10億年かそれより昔に出るわけです．

坂東：どうもよくわからんかったんですけど，いまの五界っていうのは，共生の相手が違うっていうことですか？

大野：相手が違いますね．

坂東：なんで五つに分けたのか．

大野：それはたいへん難しいです．それは難しいですね．

坂東：いま，それを説明している？

大野：いや，それを説明するためじゃなくて，私が言っているのはこういう重要な分類群というのが，他との共生ですね．他との共生から，また二次共生っていうのでできている．要するに何かが合体して複雑化するというか，そんなふうになっているっていうのは，重要なところなんだと．

坂東：結局，共生の仕方，共生する相手が違うので，五つに分かれたっていうことでいいですか？

大野：それほど単純じゃないです．ここはそれほど明確じゃないと思います．これなんかはそうですけれども，ここだったら例えばこれは，どういうふうに分けられているかっていうと，要するに鞭毛が一本と．例えばそういうことが重要な特色です．もちろんこのへんのやつは，ほとんど鞭毛を失っていますけれども，基本的には鞭毛が一本あったやつだとか，そういう分け方をしているのです．

本当にこれが定説になっているかどうか，多少，流動的なところがあると思いますけど，２年前は六つに分かれておりますけど，ここは大きく分かれていますが，これも分けられていたんですけど，やっぱりこれもまとまるというので五つに，１年ぐらい前は．要するにものすごく新しい話です[18]．

[Slide 28] 例えば共生でどういうことが起こるかというと，陸上植物，われわれがいま，普通に

[18]Updating．おおざっぱに言って，多少の出入りはあるものの，五界はますます確立される方向に行っている．

見ている植物ですね，これが陸上に上がってくるためには，もう絶対に菌類と陸上植物になるようなものの precursor との共生が必須だったんです[19]．いまも大多数のこのへんにある植物は，菌類との共生というのを非常に重要な生活手段にしています．必須ではありませんけれども，とにかくなしではかなり困る．

ご存じのように，陸上に植物が出てきたというのは，デボン紀かその前ぐらいで，そんなに昔じゃないのですけど，当然ながら，その前に地衣類があったはずで，それはカンブリア紀以前に陸上に進出していたであろうと．証拠は出ていませんけれども，多分進出していたと思います．これも当然ながら，菌類と藻類の共生の産物です．あと，大爆発的ないろいろな生物の現象ですね，例えばこれは普通の花の咲く植物と，コガネムシの仲間の共生．

それから「cryptic herbivory」というのは，植物を食べているようには見えないけれども，実際には食べているという話で，これはアリとアリマキの関係の話なんですけど，それが開発されたおかげで，爆発的にアリが熱帯雨林の林冠，熱帯雨林は地上にはほとんど何もないのでアリは住めなかったわけですけども，林の上に大進出して，アリが適応放散する，そういう話です．

大絶滅は，例えば隕石が降ってくるとかいろいろありますけれども，それ以外の生物学的大事件の第一原因はだいたい共生，生物間相互作用がカギを握っているようだと．極端な話をすると，農耕の発生が，ある意味では (大気中のメタンを増やすことで) 地球温暖化の引き金になっていますね．

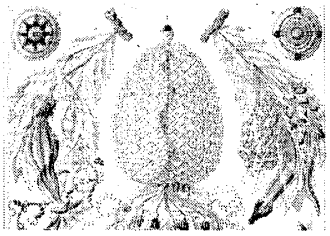
複雑化の前提としての重複，くりかえし

＊多細胞化
体節形成 (segmentation) とその分化
器官形成

＊集団化 (社会)
Eusociality(分業)
社会性昆虫など．
群体形成
Siphonophora (Class Hydrozoa)

[Slide 29]

Siphonophoreの例．
from E. Häckel, *Kunstformen der Natur*



[Slide 30]

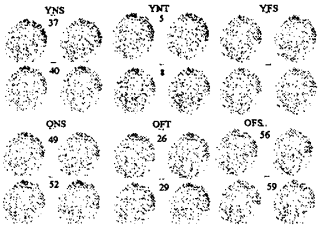
[Slide 29] もう一つ，自前で倍加する，舞台を広げるという話がある．それは多細胞化とか集団化など．これはまさに真性の symmetry breaking ですね．まったく同じものが二つかいくつかできて，それがまたいくつかに分かれる．例えば体節ができるとか，そういう話ですね．それから例えば社会においては分業するとか，いろいろな個体がいっぱい集まって複雑な身体をつくるとか．

[Slide 30] 具体的な絵をお見せしますと，これはヒドロ虫というクラゲの仲間です．クラゲって言ってはいけませんが，刺胞動物には違いない．こういうのが全部，別々な個体なのです．そういうのがいっぱい集まって，いろいろな違うことをやっている．例えば卵の，生殖に関係した部分とか，浮く部分とか，これはものを食べる部分ですね，そういうふうに分業をしている．これも本当に最初は同じものです．

[Slide 31] これはわれわれが関係している話なんですけれども，ミツバチの分業は，まさにこの対称性の低下です．親になって飛べるようになったハチというのは，みんな最初は平等なんです[20]．だけれども，ある物質を出しまして，お互いにけん制し合うわけです．

[19]今さっきまでの共生は細胞内共生だが，ここは細胞外共生の話．
[20]女王バチの相手が一匹のオスならばこれはかなり正しい．

ミツバチの分業
　抑制物質による対称性の低下そのもの
通常: Nurses for ca. 20 days
　　→ Foragers (NF transition)
Single cohort colony: after ca. 7 days



[Slide 31]

＊遺伝子重複 + その後のsubfunctionalization

S. Ohnoが強調したように

真核生物の進化にとってきわめて重要.

被子植物: 二回ゲノム全体の重複を行なっている.
Vertebrata: Hox遺伝子の二回の重複
Teleost: Hox遺伝子の初めの三回の重複

硬骨魚類に見られる三回目の重複
　多くの遺伝子がコピーを失う.

[Slide 32]

生物のことを真面目にやろうと思ったら，いかに泥臭いことをやらなくちゃいけないかという例をお話します.

普通だったらミツバチというのは，親になる，つまり翅が生えてから 20 日間ぐらいは子守りをやる．そのあと外に出て行く．ミツバチというのはみんなメスですよね．外に行くのはおばあさんばかりで，娘たちはみんな子守りをやる．どうしてそういうことになるかというと，世の荒波は厳しくて，毎日 5 パーセントから 10 パーセントのおばあさんは，出て行ったっきり食べられて帰ってこないのです．そういうところに若い身空の娘たちを送るのは，非常にロスである，もちろんそうです．そういうわけで，Nurse to Forager Transition というのが 20 日目ぐらいにあって，20 日ぐらい経って，歳を取ると，その抑制物質が効かなくなるわけです．で，外へ行くのです.

定常状態では最初から symmetry breaking があるのですね．若いやつが歳を取ったやつに押さえつけられるという．あまりいい表現じゃないですけど，そういう社会ですから，それは不思議じゃないですけど．歳を取った虫を全部放っぽり出して，羽化したばかりのやつだけをうわっと集めて，一つの巣をつくることはできます．それを「Single cohort colony」というのです．そうすると，最初はみんな若いですから子守りをやっています．だけども，7 日ぐらいになるとちょっとませたやつというか，抑制物質を出しだすやつが出てきます．抑制物質は，私の共同研究者が実験と経験から抑制物質と促進物質があるだろうと言い始めたものですが，そんなだったら抑制物質だけでいいはずだとモデルなどでわれわれがそれを示し，あとで彼のグループによって同定されました．ちょっと実際のものの名前は忘れましたけど，たいした物質ではありません，非常に簡単な物質です

抑制物質を出しだして，つまり transition のところで，脳の構造まで変わります．それはどうしてかというと，子守りをやっている連中は，それほど知能が高くなくていい．極端に言えばです．外に行くと，家に帰って来なきゃいけないし，花のにおいを憶えていなきゃいけない，そういう記憶装置の部分ががっと，本当に一日のうちに発達するのです.

そのときに遺伝子の発現ががらっと変わるわけです[21]．普通は，一つ一つの遺伝子を解析するのですけれども，そうじゃなくて，もっと collective なものがあるだろう．collective に分析する手段はないかということを，いろいろとわれわれはやっていて，その結果をここにお見せしている，preliminary な結果ですけれども．このへんが青いやつは子守りですね．このへんが赤いやつは外働きと．文字で言うと Y というのは Young か Old かということで，N というのは Nurse か Forager か，S というのが Single cohort か Traditional かというやつなんです．だからこれを見るとわかりますように，年齢は関係ないのです．歳を取っても外に行かないやつはいます．ちょっとこのへんが赤くなっていますけど，とにかく関係ない．だけど Forager は，このへんが赤くついているのです.

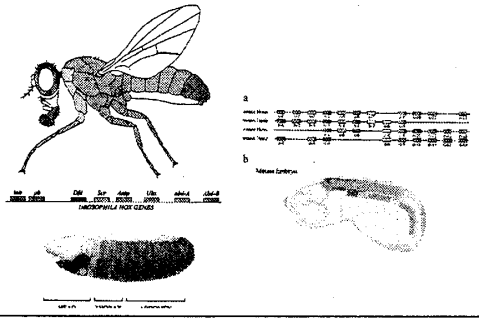
[21] もちろん遺伝子発現ががらっと変わるので脳の構造が変わる.

こういうふうに，最初はみんな同じなのが，こんなのが要するにこういうのとこういうのに相互作用で分化するのです．もちろん一匹だったらこういうことは起こらなくて，その個体の遺伝で決まったある時期に，外へ出て行くということになるかと思います．

[Slide 32] 遺伝子重複というのは有名です．いまのは重複でも，個体が増えるとか，そういうことでしたけれども，遺伝子の持っている情報を2倍にするというのは，大野乾さんが強調したように非常に重要で，例えば被子植物ですね，2回，ゲノム全体をコピーしている．

それからHox遺伝子という，身体の構造を決めている遺伝子があるんですけども，それがほかの下等なって言っちゃいけませんけれども，ほかの動物たちに比べるとわれわれ脊椎動物は二回重複している[22]．

Hox genes



[Slide 33]

One of the best appreciation of Darwinism:

What explanation was possible but that of community of descent? How incredible it appeared that this had not been seen years ago — yes, even before it was discovered that the world was round and was one of a system of planets revolving round the sun. All this starry knowledge was of little or no importance compared to that of our relationship with all the infinitely various forms of life that share the earth with us. Yet it was not till the second half of the nineteenth century that this great, almost self-evident truth had won a hearing in the world!

[W. H. Hudson, *Far away and Long ago — a history of my early life*— (E. P. Dutton & Company, New York, 1918) p329-330]

[Slide 34]

[Slide 33] [23] Hox genesというのは何かというと：これはウジ虫ですけれども，体の部分はだいたいみんな，どこも似たり寄ったりです．それが親になると全然違った構造になっていますけれども，極端に言うと，こういう体の部分ごとに違うようになるのを番地付けしている遺伝子ですね，そういうのが，われわれは4組に倍加している．これはネズミですが，われわれとネズミはほとんど変りません．もちろんこういうふうに増えればいろいろと細かいことができるようになります．

遺伝子重複は生じやすいが，
その結果が保たれるのは非常事態が重複の結果が散逸する前に生じる場合だけ?
　陸上植物
　　MADS ボックス遺伝子族のような
　　形態形成に関する遺伝子族，
　　陸上環境に適応するための遺伝子族，
　　揮発成分の生合成関連の遺伝子族
　ミツバチ
　　Royal jelly 関係の遺伝子．
　　Odorant receptor related 遺伝子族，

原核生物に重複はほとんどない．

[Slide 35]

複雑化に関する興味深い事実1
　＊いつでも舞台は広がろうとしているらしい．
　＊複雑性や系の多様化はあらかじめ種が仕込まれた後でしか生じない．
　　Latencyの存在．
　　Latent complexity:
　　Cnidalia (Anthozoa) Hox genes
　　つまり必要パーツはすでにある．
　　一種の舞台の用意
　　Latent diveristy:
　　Pre-Cambrian Metazoa
　　Pre-Cretaceous Angiosperma

[Slide 36]

[Slide 35] 遺伝子重複というのは，さっきは説明しませんでしたけれども，重複すればするほど高等になるというほど単純じゃなくて，例えばメダカとか普通の魚は，われわれよりももう一回，duplicationをやっているのです．つまり8対あるはずなんですけれども，ほとんど失っていて，た

[22] ただし，硬骨魚類はさらにもう一回重複している．

[23] *Hox*の話などをdeep homologyという．生き物は皆兄弟．この認識こそDarwinが与えてくれたすばらしい啓示だとその感激を表現したのが[Slide 34]に引用した(「緑の館」でよく知れれている)Hudsonの文章である．

いした構造をしていない．つまり使われないとなくなっちゃうのですね．だからいつでもやっぱり倍加する，つまり舞台は広がろう，広がろうといつもしているのです．だが，広がった舞台が保たれるためには，その上で symmetry breaking がある程度おこなわれなければいけない．反例はあるのですけれども，だいたいそういうことです．

どういうものが倍加したときに残っているかというと，当然ながら，必要なものですね．陸上環境に適応するのに必要なもの．例えば植物同士が関係し合ったり，こっちを追い払ったり，なんかそういうことをするための揮発成分の生合成のための遺伝子，そういうものはわっと増える．2週間前に発表になった，われわれの大学も関係している，ミツバチの全ゲノムの解読結果を見ると，例えば royal jelly をつくる遺伝子なんていうのは，わっと増えている．それからもちろん，においなんかに関する遺伝子も増やさなければいけない．よく使うやつは増やしているわけです．要するに重複というのは大事です．だけども，事実として原核生物に重複というのはほとんどない[24]．

あと5分ぐらいですから．

複雑化に関する興味深い事実2

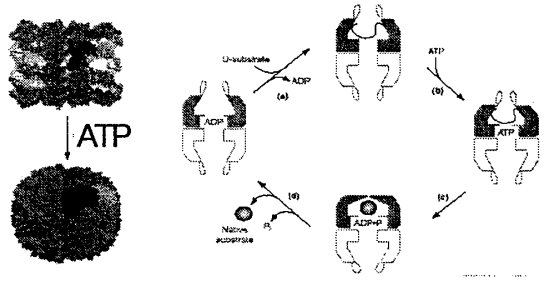
生物に生成可能な複雑性は実はたぶん低いレベルにとどまる．
(1) 進化しつつ生活もしないといけないから．
(2) 競争原理がその基礎にあるから．

生物は困難を解決せずに問題を回避する．
＊タンパク質に関する組み合わせ論的困難(Levinthal パラドクス)
＊DNA の結び目論的困難．

Gordian knot を両断するというのが生物の進化の方針である．

[Slide 37]

Chaperonin: folding catalyst



[Slide 38]

[Slide 37] 興味深い事実の中で…，例えば複雑性はどういうモードで増えていくかよく見ていると，どうも本当の複雑性まで生物はいけないんじゃないか．その理由は二つあると思うんです．生きながら修繕していっているというか，改良しているわけですから，出たとこ勝負というか，行き当たりばったりというか，そういうことをやらなきゃいけない．

それからもう一つは競争の原理がはたらいていることです．競争の原理というのは，世の中がゆったりしているときには，切磋琢磨という言葉になりますが，そうじゃないときには足の引っ張り合いになる．実際に生きている条件下では，ほとんどが足の引っ張り合いです．足の引っ張り合いがどうもいろいろなことの複雑化に寄与するとはあんまり思えない．

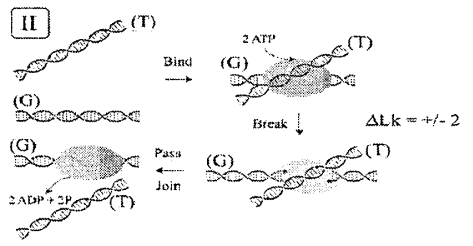
生物は困難を解決せずに，だいたいよく見ると，こういうこと (Gordian knot を切断すること) が起こっている．たんぱく質の話はしませんけれども，例えばDNA が二重鎖であって，特に原核生物の DNA は輪であるということを知って，数学者は喜んだんです．DNA はご存じのように二つに分かれなきゃいけない．二つに分かれるためには，こういうふうになっているやつをちょん切らなきゃいけないのですが，下手に捻れているのを切ると，メビウスの帯をちょん切ったのと同じように，こんなふうに絡み合いますよね．こういうことがあって，だからそれ見たことか topology が重要だと．いろいろと山のように問題があると思ったら，一切なかったのです．

ここに書いているのですけれども，生物というのは，こういう困難を解決するのに，根本的な困難を解決するというよりも，まさにアレキサンダー大王が結び目をばっさりやったという，そうい

[24] これは言い過ぎで，バクテリアでも子実体のようなものを作る多細胞生活をする連中ではいろいろと見られる．しかし，たいていの普通のバクテリアについてはほぼ正しい．

うやり方なんです．この場合はまさに結び目をばっさりですね．

Topoisomerase II



G. Charvin et al., Ann. Rev. Biophys. Biomol. Struct 34 201 (2005)

[Slide 39]

生態系(たとえば熱帯雨林)が複雑である，ということから何が帰結するか？

自発的組織能を欠くゆえに歴史的産物であり，
生物間相互作用が多くの対称性の低下の要因として決定的に重要．
無生物的環境との相互作用にさえ生物間の関係が決定的であろう．

地上部地下部の相互作用の重要性に伴って土壌中の菌類，微小生物，バクテリアだけでなく，いろいろなウィルスが重要である．

[Slide 40]

[Slide 39] こういうふうに「Topoisomerase II」というのがあって，こんなのがぶつかっていって，もつれそうになったら，ぱっとつなぎ換える酵素があります．だから結局，もう，われわれの細胞の時間スケールでは素通りなのです．topology もくそもあったもんじゃないです．

こんなまとめに何の意味があるか？

教訓は解析に活用できるのではないか？

＊遺伝子の制御関係の解析

＊情動の神経化学的解析

etc.

[Slide 41]

さて，A「帰納」の残り．

物理屋に何ができるか？

A2 現象解析のための道具を作る．
A21: 大量データの解析法
Bioinformatics といわれていろいろなされている．
(割愛)
とはいえ....

(昔の) 本職を少々...

[Slide 42]

「大量データ」から何を知りたいのか？

$10^4 - 10^6$ のデータ

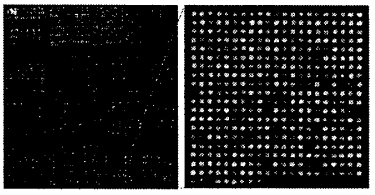
ある種の理解可能なパタンではないか？

遠くから眼を細めて眺めよう．

これはすでに出会った問題ではないのか？

[Slide 43]

Microarray



cDNA spots, for example.

[Slide 44]

[Slide 41] [25]こんなまとめをして何の意味があるか．もちろん，一つはあとで数学的に演繹できることを煮詰めて，数学的に最初の枠組み (公理系) からこういうものを全部出してやるという目

[25]使わなかったスライドについての補足: [Slide 40] は生態系は歴史の産物であるという意味でも真に複雑な系だ，それは生物間の相互作用によって支えられている，ということのまとめ．[Slide 44] は Microarray の実例．

標はあるのですけど，ここではそうじゃなくて，別の解析にも活用できるんじゃないか．

例えば遺伝子の制御関係，遺伝子がいっぱいあります．われわれの遺伝子でタンパク質になる部分が，例えば人間だったら 1.5%で，でもあとのその 10 倍以上の遺伝子は読まれて何かやっているわけです[26]．そこに combinatorial difficulty があると言われていますけれども，組み合わせ論的な困難というのは，多分，解きようのない問題だから，そんなものは回避しているに違いない．そうすると，いろいろ別の話がある．まともに combinatorial complexity を扱うようなことはやらなくていい．

帰納の残りの部分ですが，これはいますぐにでも，普通の，特に統計物理をやる人はすぐに参加できるのですが，大量データの解析．どうして大量のデータがいるかというのはもう説明する時間はありませんけれども，要するに，microarray という手段があって，われわれの身体の中の遺伝子がどれぐらい読まれているかというのを，時々刻々見ることはできます．時々刻々と言っては少し嘘で，例えばミツバチの，さっきの解析をやるときには，頭はちょん切られていますから，破壊的な実験なんですけれども，少なくともいっぱい集めてサンプルしていけば，時々刻々，何が起こっているかというのを，見ることはできます．

そのときに，遺伝子の数というのは 1 万ぐらいはすぐあるわけで，1 万ぐらいのやつがついたり消えたりしているというパターンを見て，それから意味のあるものを引き出さなきゃいけない．それはどうしたらいいだろうか．ある種の幾何学的なパターンを見抜くというのが問題だろう．そうすると，ごちゃごちゃしたものがあって，何かあるんじゃないかと思うときには，普通は遠くから目を細めて見るとか，やりますね．だけどそれは，よくやっている手段で，まさに「くりこみ」です．

くりこみの本当の意味は何なのか？
何をしていたか?
　短い時間経過する/少し遠くから眺める/
　　サンプルを加える
　つまり，少しづつ何かやっている
何のために？
　全体的なパタンを見抜くために．

ではどういう基準で安定な記述を見抜いているか？
　見抜くべき結果が大きく変わらないように決める．

[Slide 45]

少しずつ加えていった結果が大きく積もらないように
全体的パタンを修正していく．

＊特異摂動論

$$y(t+\Delta t) = y(t, A(t)) + \Delta t B$$
$$\rightarrow\ y(t+\Delta t) = y(t, A(t+\Delta t)) + o[\Delta t]$$

＊強大数の法則

$$S_n = \sum_{i=1}^{N} X_i \rightarrow \sum_{i=1}^{N} (X_i - m) = o[N].$$

漸近的な安定性の追求．

[Slide 46]

だからくりこみ的な手段というのは，何をしたかというのをもう少し反省して，パターンを見抜くために使おう．だんだん駆け足になってきます．

[Slide 47] ものすごく粗い話ですけれども，古い話題を言っておきますと，スローガンはここに書いてある話です．記述統計とは発散の記述である．これはサンプルの value です．N 個のサンプルがあって，その総和がこれですので，総和は平均がゼロでない限り，オーダー N で発散します．こんなことは誰でも知っています．平均値とは何か．普通はこれを N で割るというのですけれども，こういう見方ができるわけですね．何かある数を引いて，発散の程度を抑えるという，counter term です．これが可能であるというのが，いわゆる強大数の法則です．これが almost sure.

要するにデータを増やして，次々に加えていっても，あんまり動かないような部分を取り出すことで，全体の特徴付けをすることができる．

[26]今やゲノムのすべての部分が読まれると信じられているから困難はここに書いてあるどころの話ではない．

記述統計とは発散の記述である

$$S_N = \sum_{i=1}^{N} X_i = O[N]$$

$n = 1$: 強大数の法則

$$\sum_{i=1}^{N} (X_i - m) = o[N]$$

$n = 2$: 中心極限定理 (in law)

$$\sum_{i=1}^{N} [X_i - m] = \sum_{i=1}^{N} [\sigma \operatorname{sgn}(X_i - m)] + o[N^{1/2}]$$

教訓は何か？
　データを増やしていってもその効果が小さくなるように特徴を抽出せよ．

[Slide 47]

大量データの統計とくりこみ？

A22: Natural historyの定量化
　これは大問題だ．実験物理学的にも

　ゲノムなどミクロな方のデータは大量の数値としてあふれている．
　しかし，生物はゲノムではない．
　生物現象はphenotypeのレベルの現象である．

　Organismal Phenomics ()

が必要．例えばどういうことをしなくてはいけないか?

[Slide 50]

[Slide 50] [27]もう一つ,「Natural historyの定量化」といっているのは，ここに「大問題」と書いていますけれども，どういう問題かといいますと，いままでDNAの解析とか何とか言っていて，いまはゲノム解析とか何とか言っていますけれども，われわれはゲノムじゃないわけです．DNAが飛んだり跳ねたりしているわけじゃないということです．生物学としては，DNAを知りたいのはDNAそのものが知りたいからじゃなくて，生きもの，オーガニズムを知りたいからなんです．したがって，ミクロのレベルというのは，それで何かを説明するために調べているわけです．ところが説明しようと思うほうがものすごく曖昧なことをしていたり，あんまりデータがなかったり．

例えばショウジョウバエのオスの性行動がどうのこうのという記述では，例えば背中を3回叩いたとか，その程度の，20ぐらいの項目でしかない．ところが相手にしている遺伝子のほうは，1万5000とか2万とかそんなにあって，そういうものすごい情報のアンバランスがあるんですね．したがって，行動とかわれわれの目に見えるところ，つまりNatural historyが伝統的に相手にしているものを，もっと定量化しなきゃいけない．そういう問題があって，われわれはそれを「Organismal Phenomics」といってpromoteしようとしているのです[28]．

これで何をするかという写真もあったんですけれども，やめます．

B. 演繹的研究:

「数学に寄与できる程度の理論は可能であるのか?」

　例えば力学系の理論のように．

帰納的にまとめたことを自然に出す最小の枠組は何か？

物理の問題かどうかはわからない．

[Slide 53]

Darwinismは演繹されるべきものである．

大雑把に言って:

複雑系を(神の不断の介入なしに)擾乱にみちた世界で保存するにはどうするか？
　自然発生しないから補助条件の保存が必要．

補助条件がdegradeするのをどう回復するか？
　(0) 正解がわかっていれば世話はない．

そういうことはない．誤り訂正符号もいずれは破綻する．

[Slide 54]

[Slide 53] 最後に演繹的研究というのは，数学に寄与できる程度の理論が可能であるか．力学系の理論というのは手本です．例えば何をやりたいかというと，少なくとも定性的な問題でもいいですから，さっき言ったような帰納的にまとめたことを出す最初の枠組みは何かという質問に答えを出したい．Theory of dynamical systemsの向こうをはったようなTheory of biological systemsを

[27]とばしたスライド: S. Rajaram, Y.-h. Taguchi and Y. Oono, Physica D **205**, 207 (2005) にある話.
[28]Kim Hughesと.

つくれるかというのが問題である．これはまだまだ，全然，誰もやっていない話です．

[Slide 54] 例えば，どういうことを考えているかというと，普通，複雑系の場合でも，生物でも，Darwinismはもう，公理なのです．Darwinismはもう成り立つと思っているのですけれども，実際にDarwinismは演繹できるのではないか．前提は何かというと，複雑な系というのは，自分では絶対に壊れたら生き返らないものです．複雑系をノイズに満ちた，あるいは敵意に充ち満ちた世界で保存するにはどうするか．自然発生しないのですから，補助条件をちゃんと保っていなきゃいけません．補助条件にさえ傷がつくのです．

では補助条件に傷がつくのをどうするか，その補助条件の正解がどこかにポストされているならそれは簡単です．例えば誤り訂正符号みたいなものがあれば，それはあるところに正解がポストされているようなものですけれども，もちろん誤り訂正符号も完璧ではありません．

正解を推定できるか
(1) [統計的] 誤りが稀であることを使えるとする．つまり統計的手段．
(11) [大域的情報] 多数決をとれば正解がわかる．大域的情報を許さなければ，多数決は使えない．
(12) [局所的情報] 統計的手段で，選択基準を局所的に決める方法しかない．

ここまで来ると，正解も選択基準も場当たり的なものにならざるをえない．
よって，何らかの競争しか決めるすべはない．

Darwinismでしか複雑系は維持できない．

[Slide 55]

Darwinismは複雑系の必要条件である．
Intelligent DesignのためにさえDarwinismが必須．

しかし，
Darwinismが機能しても複雑になるとは限らない．

世界はある条件を満たさなくてはならない．
例えば:
知性の進化のために世界には法則性が必要．

問題は:
複雑性の程度と世界の性格はどう関係しているか？

[Slide 56]

[Slide 55] そこで，統計的に推定できるか．で，もちろん普通の考え方というのは，誤りというのはあんまり起こらないだろうから，多数決を取れば正しいものが出るだろうというわけです．しかし多数決というのは大域的情報で，すべての個体が見えることによった，つまり神の視点です．これは禁じ手です．実際の自然科学系では禁じ手ですから，結局は局所的にやらなきゃいけないのです．局所的にやると，正解の選択基準が場当たり的なものになる．要するに誰が正しいかわからない．強いものが勝つしかない，結局，競争が不可避になる．

[Slide 56] 例えばさっきもちょっと言いましたけど，Darwinismが機能しても，複雑になるとは限らない．例えば知性が進化するためには，この世界というのが秩序立っていなきゃだめです．要するに知性というのは法則性を見抜くためのものですが，外界に法則性がないときには知性には見えないのですから，当然ながら外界の性質に重要な制限がかかります．で，結局，複雑性の程度と

ChomskyのMathematical Liguisticsはいろいろな意味できわめて参考になる．

言語の本質を衝いてないにしても．

生成文法はルールと結果の複雑性についての一般的考察を促した．

[Slide 57]

Darwinism自体の限界はなにか．

要するに，競争の結果には限界がある．

それは何か？

競争的資金は文化を阻害するか?

多様性を阻害しうる．

I am a coscientious objector of MS.

[Slide 58]

いうのは，そのものが住んでいる世界の性格によるので，それがどう関係しているか，考えないといけない．

[Slide 57] ここである意味で手本になるのは，Chomsky の Mathematical Liguistics ですね．言語の本質は，ほとんど衝いていないと言われていると思いますけれども，言語の，人間の自然言語のですね，その面白い部分を，幻想かもしれないけれども，だいたい捉えている．で，一応面白い数学系になった．せめてそれでもいいから，そういうことができればいいと思っています．

[Slide 58] もう一つ重要な問題というのは，Darwinism には制限がある．さっきも言いましたように，生物はとことん複雑にはなれないんじゃないか．結局，競争の結果には限界があるというわけで，私がパワーポイントを使っていないのもそういう理由です．多様性を阻害するのはよくない．

まとめ

複雑系の科学は補助条件の科学である．

補助条件が重要な最たる系は生物系である．
Natural History を真面目にとろう．

物理＝自然学としていかに筋をつけるか？

現象の整理，道具の開発，そして理論体系の開発

[Slide 59]

生物に学ぼうとするとき，複雑系の性質として何が一番教訓的か？

教訓　「生物系は困難な問題を解かず回避する」

倫理的問題や環境問題で困難な選択をしないで済むようにあらかじめ工夫することこそが倫理学や環境科学の最も基本的課題だ．

人口問題の解決はその主要なカギ．

研究に関する教訓

「現象の整理をおろそかにした性急な普遍性の追求は普遍性の追求自体を阻害しうる」

言語学の失敗を見よ．

[Slide 60]

[Slide 59] まとめますと，複雑系の科学というのは，構造化された補助条件の科学であって，それは基礎科学のまた一つ別の frontier になるのではないか．で，それをやるためには，もちろん地道に生物を見るというのは必要，生物のためにやっているわけじゃないんですけど，生物を見るのは重要なことである，つまり Natural history を真面目に取るということは，重要なことだ．

それは何のためにやっているかというと，物理が自然学として，自然学としていかに筋をつけられるかという立場でやっている．そのために現象の整理でやりましたけど，道具の開発っていうのは非常に大事で，これは大変ですが，生物をそれほど知らなくてもできるという意味では，誰にでもとっかかれる．それから例えば就職先の話がありましたけれども，そういう意味でも，これは非常にいい分野です．どうもありがとうございました．

金子：質問は．はい．
村瀬：基礎研の村瀬です．ちょっと確認ですが，複雑性の起源というのは，要するに初期条件というか，補助条件によるっていうか，そういうことですか．
大野：複雑性の起源は論じておりません．
村瀬：そうですか．
大野：起源というよりも，要するに複雑系の特徴は何かと言った場合に，そうだということです．
村瀬：それから複雑系を複雑化させる指導原理というものが．

大野：次々に複雑になるのは，生物で見た場合にですよ，これは．

村瀬：重複と，それから共生．

大野：舞台を広げる手段として，見たところでは，重複と共生があると．ほかにもあるかもしれませんが，あんまり目につかない[29]．

村瀬：それで一つおうかがいしたいのは，ジョン・ホーナーの仕事で，横軸，生物サイドを取ったときに，種の多様性が減衰するという局面と，それから逆に細胞の多様性が増大するという局面があって，両方を足すと summation がほぼ constant という感じが出ているのですが，それは何か．

大野：それはスケールがそうなっているからですね．

村瀬：ラフに言えば．はいはい．そのへんに何か発生原理というか，指導原理が隠されているように，僕は見ているのですが．

大野：それは面白いですね．私はまだそこまでは考えていないのです．どうもありがとうございました[30]．

山田：Pasteur の原理から入られましたけれども，大野先生は生物が複雑系のいい例であるとおっしゃったと思うんですけど．

大野：それはみなさんがそうおっしゃっているということですので．

山田：それでその生物の特徴である生命っていうのは，どう考えるのかということと，生命っていうのを物理で研究できるのかどうかということを，おうかがいしたいんですけれども．いろいろな考え方があると思うんですけど．

大野：私のここの立場では，生命の起源については一切触れていません．それはいま，手が届くと思っていないからです．いま，本当の意味の科学になるか，いろいろと speculation して，実験するとたいへん面白い分野であることは認めますが，だけども非常に決め手を欠く．いろいろなことが言えますけれども，決め手を欠くので，私は故意に避けているわけです．

山田：生物と無生物の違いっていうのは，本質的な違いっていうのは何と考えますか．

大野：例えば NASA はどういうことを言っているかというと，進化し得る化学システムが生命であると．それから例えば代表的な Undergraduate Textbook によれば，それは「Genetic system which is capable of metabolism, reproduction and evolution」と言っています．私はそのなかでも metabolism を完全に無視しています．だから生命が何かとか，そういう大きな問題は面白いですが，私としてはちょっとやめておこうと[31]．

早川：ようわからんのですけれども，Natural History が大事だということで，例えば分化と空間の．分化していくじゃないですか，進化生物学で 5 回分解するとか，カンブリア爆発があったとか，そういう Natural History の分岐とかを，枠組みというか，非常に哲学を語っただけでは，ちょっとよくわからないところもあるけれども，記述し得るのかどうかというところが．

大野：僕はし得ると思いますけどね[32]．

---

[29]本文中の補注で述べたようにここには根本的な理解の浅さがあった．これらはそう重要でもない．お膳立てをするだけ．

[30]とはいったが，しかし，海綿動物さえ細胞のタイプはよくみるほど増え続ける一方である (これはそのゲノムから見てそう不思議でないだろう)．まして Metazoa ならば多様性に差がないと考えるべきであるし，種の多様性もまともにはわかっていない (よくわかっていないグループについては極端な過小評価であることはよく知られている) ので，現時点でこのような通則が信頼できて意味があるとはきわめて考えにくい．

[31]情報とは何かよくわからなくても情報理論は意味がある．むしろ「情報とは何か」という問題を考究しない，というのは情報理論にとって大変重要だった．「情報」そのものを研究するのは不毛だったのではないか．

[32]哲学と受け取られたようだが，ここで哲学などは語ってない．事実を整理して定性的現象論「世の常」を提示しただけである．それを哲学と呼ぶならば，熱力学は哲学のありうべき究極の姿だ．

早川：し得るためには何が必要なのか．これだけはいつもはっきり語っていないので，答えられないのかも．

大野：それは申しわけないのですが，これからの話と言ったほうがいいのですが．

早川：ということなんだけれども，そのために何が必要かという．

大野：何が必要かという，それは,,,.

モデルをつくるのは簡単なんですよ．それで出すのはできるんですね．そういうふうのじゃないレベルにいくには，どうするかというのに，苦慮していると言わざるを得ないのです．それが正直な答えです[33]．

要するに，ここに出てくるいろいろな側面をモデル化するのは非常に簡単です．でも，So what?なのです．

金子：普遍性を捉える現象論で，熱力学が一番成功したわけだと思うんですけれど，生物の現象論をつくる際に，熱力学がいかにつくられたかとか，そういうことから学べること，それとは違って，何をしなきゃいけないとかという，そういうところについては，何か．途中で安定性とかという記述がありましたね．あれは熱力学でも同じだと思うんですけど．

大野：だけどそういう意識はあとからですよね，熱力学としては．だから単純に答えを言うと「わかりません」なんですが，正直言って．

結局，だから構成的立場が絡んでくるのですけど．熱力学というのは熱機関とかなんか，そういう工学的な関心から出てきた質問に答えるというかたちでですね．だからそれを単純にアナロジーをやれば，遺伝子工学みたいなもの，例えば伏見さんがやっておられるようなやつですね．そういうのから出てくるものが，何か現象論にインパクトを与えるかどうかということなんですね．そちらがやっておられるような構成的な手段というのは，いい方向を与えていると思うんですが，いまのところ，熱力学的な現象論にインパクトを与えるようなものが，そんなに出ているというふうには思わないわけです．

金子：例えば再生工学とかをやって，だけどいま，みんなもう，人間もそのうちつくれるだろうみたいな，再生できるみたいになっているけれど，熱力学が原理的限界を与えたように，何かそこにどういう意味の限界があるのかということが出てくれば，そこから熱力学的な現象論がつくれる．

大野：もう一つ言っておかなければいけないのは，いまの工学というのは，どうも昔の熱力学の時代の工学と，ちょっと違うというか.... 昔は原理を突き詰めることを，本当に真面目にやったわけです．いまはそれは邪魔だと．はっきり言って．例えば自動翻訳なり自動音声認識をやるのに，どういう原理でわれわれが言語を認識しているか，そういうくだらないことを考えるのをやめろ，そんなことをやらないで，巨大なルックアップテーブルをつくって，いかにそれを計算機で速くやるかというほうがはるかにいいんだと．例えばタンパク質の3次構造の決定だって，そっちのほうがはるかに速いわけですね，実際に統計力学をちゃんと使って，1次配列からどんな形になるかということをやっている人はいますけれども，友人にもいますが，彼によれば，自分の精神衛生のためにやっていることで本当のお金取りは，科学じゃないほうでやるんだと．で，工学についてはあんまり楽観できないのです[34]．

宮田：大変遠大な話で敬服しちゃうんですけれども，一つだけ確認させていただきたいんですけ

[33]ただし，手っ取り早く使える数学は計算の理論など基礎論に近い部分である．

[34]金子さんの質問にまともに答えてないので，答えに多少とも近いことを補足．夢想することは，たとえば，複雑化の方向性に関して，生き物が存在しうる物理的条件を十分保った巨視的孤立系で熱力学のゼロ法則のようなことがあるのか，などということだが，これと計算論的困難の問題の関係などから多少一般的なことがいえる可能性は皆無ではないと考えている．再生工学については限界はない．理由は単純で，大量に原資材を生身の生き物に仰ぐからである．それをしない理学的研究が再生工学に興味を持ってもらえるとは思えない．まさに自動翻訳と似たような話．

ど，先生は最初から言っておられるように，複雑になっていって，多分素材としては重複．重複っていうのは遺伝子もあるし，染色体もあるし，細胞もあるし，そういう意味の重複と，それから共生と言っておられるのは，まだそれはほかの生物とのインタラクションですね．そういうもので複雑化していくというのは，確かにそうだと思います．

そうさせている力っていうか，ちょっとスライドの中で先生が言われましたけど，あんまり競争原理がはたらいていないというような感じのことを言われていたように思いますが．

大野：できるところはですね．倍加するとかそういうところは，最初のレベルは競争原理が働く[35]．例えばごく最近の話だと，Eucarya のゲノムストラクチャー，ゲノムのコントロールストラクチャーは，どうやって発生してきたかという問題で，それが自然淘汰の結果として出てきたとは，到底説明できないという説があります．それは Lynch という人が言っていますけども．

宮田：自然淘汰でないとすると，何．

大野：要するにドリフトです．Eucarya というのは，Procarya に比べると桁違いに個体数が少ないわけですね．でわれわれは非常に個体数が多いですけれども，例えばゾウとか何かだと，非常に個体数が少ないわけです．だからフラクチュエーションがものすごく大きい．そのフラクチュエーションで，いいところにいったやつから出てきたんだと．それをかなり説得力あるかたちで展開している人はいます．だからそういう意味では，キーのところはセレクションでなかったと．

宮田：そういう場合があるかもしれないけれども，基本的にね，そういうある細胞ないし遺伝子を付け加えることによって，付け加わらないもともとのタイプに比べて，ほんのわずかでも生存力と生殖能力が増えれば，それは生き残っていって，広まるわけなのですよね．で，通常それが自然選択といわれる現象でしょうけれども，そういうかたちで，例えば何かを融合することによって，新しいファンクションなり，要するに生存上有利な形質ができるというかたちで残るという説明は，あり得ると思うんですけど，それは．

大野：それはもちろんあり得ると思うんですが，どうもこういう大規模なところで起こっているところを見ると，そういうことで起こっていないほうが多いんじゃないかというのが，私が言っていることです．例えば Eucarya の発生そのもの，または遺伝の制御機構の発生自体は，淘汰で決まったものではないと言っている人がいるくらいですから．私としては，本当に大規模な変化ですね，例えば大規模な変化が，非常に小さな足し引きの組み合わせで出てきたようには見えないんですよね．

もちろん科のレベルとか，目のレベルくらいなら，そういうことはあるかもしれません．だけどこの場合は domain であり，kingdom のレベルですね．

宮田：確かにそういう可能性はあるかもしれません．ただ，selection，自然選択を exclude する理由が，あんまりよくわからない．

大野：excludeっていうか，もちろんそのあと (自然選択の寄与) が非常に大きいのです．

宮田：最初の段階でいいんですけれど，あんまりよくわからない．あってもちゃんと説明ができるんじゃないかと．

大野：そうかもしれません．だけど私としては，これは説じゃなくて事実を集めただけですから，解釈をしているわけじゃないです．ただその解釈をすると，さっき言いましたように，セレクションは当然効いています．舞台が大きくなるというときに，例えば多細胞生物が出るというのはどういうときかといったら，例えば酸素レベルが現時点で 5 パーセントになったと

[35] 舌足らずだが，倍加すること自体は偶然の産物．それが本当に保存されるかどうかは競争原理による．しかし，個体数が原核生物のように巨大でないとこれは貫徹されない．

きだと．なぜそのときにしかできなかったのかというと，(そうでないときには) われわれは，多細胞になったやつは損するからなんです．そういう意味では確かにセレクションが効いています．

そういうレベルのセレクションは当然，いつでも効いています．だからそういう意味では，あまり矛盾していないのではないでしょうか．例えば重複で遺伝子が残るのはどういう時か，それが使われたときだけです．なんで使われたときだけかっていうと，使って儲けるときだけなんですね．だからそういう意味では，当然セレクションは効いています．

だけれども，実際にそのときに出てきている構造が，各時点のセレクションで決まっているのではないですね[36]．

宮田：どうもありがとうございます．あとでゆっくり考えてみます．

坂東：すみません，結局，複雑系といいますか，新しい機能を獲得していくというのに，やっぱり何か，critical point というのがあるんだと思うんですけども，そこがちょっとわからなかったんで聞くんですけれども，まずね，ともかく，多体系ということと，異質の粒子が入ってくるということと，その二つのコンプレキシティがあるとおっしゃったのですよね．

いや，まあ，細胞レベルか何かは知りませんけれども，要するに共生というのは，異質のものが，異質の粒子が．

大野：異質じゃなくてもいいんですけど，とにかくそれは舞台の倍加というふうな感じです．

坂東：そうなんですけど，違う粒子，粒子描像でいいますと，同種粒子が多体系を組むという場合と，異質な粒子が入ってくるという場合とで，どう質的に違うかっていうところが，どうもこの話を聴いていて，はっきりしなかったんですけど．

大野：それはもちろん，最初に (質的違いの) ある場合は，対称性が破れるときに最初からバイアスがかかっているのです，異種の場合は，最初から．本当の意味での symmetry breaking じゃないです．当然ながらバイアスがかかっている．それがエンハンスされる，助長されるだけです．

坂東：それでやっぱり，例えば同種粒子の場合でも，普通，その間の相互作用によって，critical point というのがあるはずで，そういうものの，物理としてはそういう point がどこにあって，何が，例えば粒子がいくつ集まれば，これはこういう point になるんだとか，そういうこと．

大野：例えばモデルをつくって．極端な話，われわれのここの骨が 1 本で，ここは 2 本ありますね．その理由は何かというと，本質的に骨をつくる precursor の細胞が，筋肉や何やらの precursor になる細胞から，接着力が違うために分離するので，spinodal decomposition みたいな話です．spinodal decomposition のときに，最初に二つできるか一つできるかっていうのは，それは系の大きさで決まって，だからこの系の大きさを変えていくと，骨の数が変わるわけです．そういうような話はいくらでもあるので，これはやろうと思ったらいくらでもできるわけです．

それはまさに bifurcation が起こるパラメーターがいくつかという，そういう質問ですよね．

坂東：ええ，そうですね．

大野：それはだから，個々の問題でそういう部分はいくらでもある．

坂東：特に生物の場合は，質的な変化というのはかなり，critical にあるんじゃないかっていう気がするので，聞いているんです．つまり何かというと，生命とは何かという，さっきの質問もありましたけど，結局，どこかでわれわれは多体系という，いわゆるわれわれが熱力学で

[36] 選択は出てきたものの中から選ぶことしかできない．複雑な系では当然ながら，可能性の数は全生物の細胞の数をはるかに凌駕するから，選択が広い可能性をみわたして構造を選べるはずはない．この意味で複雑系というのは歴史の産物に incremental な多少の選択の結果を継ぎ足してできたものである．

扱っていたようなものと違う現象が何か起こる，で，その境目のところが何だったのかというのは，あまりよくわからなかったので．

大野 :それはここでは，全然そういう深淵な問題は一切論じていないんです．だから生命の発生の話ですよね，それは．

金子 :発生じゃなくても，細胞のサイズはたいていこのくらいなきゃいけないとか，Prokaryote は複雑じゃなくて，Eukaryote は複雑だっていったときに，どうして，じゃあそこの境目は何なのかとか，そういうこと．[37]

坂東 :いや，だから，複雑性とは何かということが，何によって決まっているのかっていうのは，一番最初，先生は確か,「問題が明らかになっていないと，答えは出ない」とおっしゃったのかな．

大野 :いや，それは現象を解析するときに，知りたいものをあらかじめ知っていない限りは，それは見出せないということです[38]．

坂東 :いや，そういう意味では，そこはどうもすっきりしない.....

大野 :それはすっきりしないのは当然．完成した話をしているのなら，すっきりしなきゃいけないんですけど．

坂東 :悩んでおられるのは，よくわかりましたけども．

大野 :正直に，悪戦苦闘ではあります．

金子 :ほかによろしいでしょうか．いろいろあるのですが．

大野 :まだすぐは帰りませんので．帰るというか，ぱっと荷物をまとめて帰ったりしませんので．

金子 :だいぶ時間を超えてしまったので，多分．はい，じゃあどうもありがとうございました．

---

ph12 大野/金子/大野

[37]補注: 後の方に対する答え．基本条件は構造的基本条件 (SFC, つまり，幾何学的構造そのものが核や template になったりするもの) と指示的基本条件 (IFC, たとえば転写因子やスプライシングコードなどのように，幾何学的構造の指定でなく，あることをするかどうかというようなことを決める条件) に大別できる．SFC のみを主に使う系と，そうでなく IFC をも活用する系がある．前者が Procarya 的路線であり，後者が Eucarya 的路線である．この二つしかない．しかし，Critical point があってたとえば Procarya レベルが Eucarya レベルになったと考える論理的必然性はない．実際，Procarya は Eucarya から進化したものであってもいっこうに矛盾はない．

[38]「複雑性とは何か」というような質問を (的を絞るための作業仮説として以外には) 意識的に避けることから私の議論は出発している．皆さんが複雑だというものの重要な特徴は何であり，それについて何が観察され，それから何が言えるか，といっているのであって，これこそが「複雑系」を定義するなどといってはいない．新たな研究をするときはたぶん「問題が明らかになっていないと，答えは出ない」というのではなく「答えを知っていないと答えは出せない」に近いだろう．