

物理の道しるべ

←研究者の道とは何か→

第19回

自己言及的伏線遍歴

金子 邦彦

1. 大学院まで

人工知能、認知科学の元祖、限定合理性で経済学の大きな潮流を作り、という20世紀の巨人の一人、Herbert Simonは自身の伝記を学者人生のモデルだとして著している。とてもそのような業績も、臆面のなさも持たない者にとって、果たして一体何を書くべきかは問題だ。道しるべどころか、せつかくこれまでの皆さんの書かれた道案内を壊してしまいかねない。普遍的なことを書くべきなのだろうか？ そうすると、まあ、理論物理に進む人並みには、数学や物理が好きだった高校時代を過ごし、すぐれた友人に刺激を受け…、と書いていくことになる。とはいえ、そのような標準的なことは期待されていないようにも思う。すると、気体分子運動論の描像による歴史観は可能か、でも革命のときはミクロ（個人）がマクロにまで影響するのではないかと考えて歴史に進もうか物理に進もうか悩んだとか、またルシャトリエ原理を聞いて変化に抵抗するような応答が起こるといのは安定したシステム一般の基本的真理に違いないと妙に興奮したとか、荘子に著されるような、文字で伝えられない真理を文字で伝えるということはどういうことなのか日々考えたり、と多感な(?)青春時代を過ごし…、と書けば少しは期

待に添えるのかもしれない。とはいえ、荘子好きは湯川秀樹由来の日本理論物理学の伝統(?)として、さして目新しいことではないかもしれない(なお、負の(?)側面を挙げれば、ラジオを自分で作るような実験好きの少年でもなく、天文少年でも昆虫少年でもなく、果たして、理系向きなのか? という疑問を振り払えずにいたことだろう)。

かくて大学に至る。第2量子化から入って第1量子化が導かれてくるという、伊豆山健夫先生の量子力学の講義に感銘を受けた教養課程、熱力学への関心、久保亮五先生の統計力学の講義、といった、物理学生の通常の経緯を挙げてもよいのかもしれない。実際、まじめに物理を修得したけれども、できあがった大伽藍に少し装飾をほどこすよりも、どこか標準からはずれたところに新しい建物の土台を作りたいという気持ちはぬぐえずにいた。背後には、標準的理系ではないのでは、という異邦人的感覚があったのかもしれない。

高校時代、生物学は嫌い、実際、今でもたくさん遺伝子や分子の名前が出てくるとうんざりしてしまうのだけれど、なぜか、生命とは何か、これを物理にできないのかな、とおぼろげに思っていた。もちろん、Schrödingerの『生命とは何か』²⁾から始まり、Szilard流のMaxwell's demonと生命の関係を考えたりしていた。昔の岩波の基礎物理講

座には「生命の物理」³⁾という巻があって、Szilardの話も、von Neumannの自己増殖オートマトンの話も載っていて、生命の中に新しい物理を探せたらなあ、という若者には刺激的であった。そして、もう一つの流れとしては、教養課程の杉本大一郎先生の宇宙科学の講義で初めて聴いた、Prigogineの散逸構造の話がある⁴⁾。非平衡と生命現象の関連を漠然と考えながら、宇宙には平衡に落ちるのをできるだけ遅らせようという傾向があって、その普遍的表れが生命なのではないか、といった妄想を抱いたりしていた。背後には、小松左京のSFに現れる、「この地球上でのたまたまの進化に縛られない、宇宙一般に成り立ちうる普遍生物学構想」⁵⁾に心躍らされていたことがあったのだろう。

こうして生命現象の物理を始めました、となればストレートなのだけれども、生物物理の講義の冒頭で、世界的にも著名な教授から、生物物理には理論はなくて実験だけです、という、明言がされる。先に述べたように、そして大学の授業でさらに確認したように、実験が全くもってできないわけで、暗澹たる気分になったことを覚えている。とはいえ、しばしば悲観主義者の言動をとりつつも^{*1)}、基本はどこかで楽観的なのだろうか(だいたい人は悲観主義と楽観主義がマトリョーシカのように入れ子になっているものなのだろう)、いつか生命を理論物理として理解できる日が来る、という風に無根拠に思っていた節もある。

ちょうど4年生の久保、鈴木研での演習で、出版されたばかりのHakenのSynergetics⁶⁾を読むことになる。一方では、Prigogineグループの活

動⁴⁾もあって、平衡から遠く外れた非平衡現象の物理の先に、生命を理解する道があるのでは、という楽観が許される時代でもあった。というわけで、その方向へ魅かれつつも、果たして本当はその道があるのか、どこから入ればよいのかはよくわからないまま、大学院に至る(1979, 4月)。——こう書いてみると、大学院進学まで、いかにも必然的道筋を歩んでいたかのように見えるけれど、それは後から見ればそうみなすことができるだけなので当然各所で人並みに悩み、云々。それは省略。

2. 大学院時代

指導教官の鈴木増雄先生から読んでみたら、と最初にもらった論文は、(誘電体理論で著名な)Fröhlichのもので、細胞膜の電気双極子が非平衡状態でBose-Einstein凝縮と同様な仕組みでコヒーレントな振動を示し、それが生命の機能と関連している、という、極めて独創的で、標準から外れたものだった⁷⁾。たぶん、普通の学生にこういう論文を渡すことはないだろうから、こちらの指向性をよく考えてくれてのことだろうと思う。実際、この一連の研究はすごく面白かったし興奮した。ただ、この先を考えると、まず実験するしかないのでは、となり、残念ながら、その方向の研究はできなかった。しかし、最初にこの論文との出会いをいただいたことは、自由に発想し異分野へ越境していく姿勢の上でも大きな原動力となった。後年、細胞分化を研究する際に、振動の原因は違うにせよ、その同調性の変化を重視した深層心理には、この論文の記憶があったのかもしれない。

結局、修士の時期には、非平衡現象でのゆらぎやそれが絡む秩序形成に関して、確率過程を用いて調べていた。自身が一人で書いた最初の論文は、確率過程において速い変数を消去して、遅い変数だけのLangevin方程式に持っていくというもの。もともとは先述のHakenが得意とする、速い変数の断熱消去、つまり $dx/dt = f(x, y) = 0$ を解いて速い変数 x を y の関数として書いて、それを $dy/dt = g(x, y)$ に代入して遅い変数 y だけの式を得るという手法があり、それに対して、揺らぎを含

*1) 悲観主義といえ、大学の卒業文集(1979)に書いた文章は、2025年、人類が破滅的危機に陥っているという前提で、生物物理は2000年頃に進んだのに歴史物理学が発展するのが遅れたのが悔やまれる、と振り返るといった内容。2025年というのは人口が指数関数的に増えていけばそのあたりでまずくなるだろうというローマクラブの予想に拠った。いくらなんでも指数関数で増え続けるってほど、人類は愚かでないだろうという期待をよそにいままでのところ指数関数で増えている。なお、湾岸戦争だとか、中国ですら実質上資本主義経済になるとかも書いてあった(ソ連邦の崩壊は一部で既に予想されていた)。何はともあれ $dx/dt = ax$ ($a > 0$)の数理の意味することをもう少し多くの人が共有してもらえたらよいのと思う。

んだ Langevin 方程式の場合はどうしたらよいかという問題。たまたま読んでいた Stratonovich の確率過程の本に出ていた手法をまねして、固有関数展開をすれば導ける、というもので、決して独創性の高いものとはいえないけれども、一応、後に Risken の教科書⁹⁾に取り上げられるようになる程度の評価は受けて、多少の自信にはつながった。

この他、確率過程の側面からの非平衡現象をいろいろ調べた。様々な非線形 Langevin 方程式を解いて緩和過程を調べる、富田-富田の不可逆循環⁹⁾がリミットサイクル生成途中で増幅される、蔵本-都筑の複素 Ginzburg-Landau 方程式¹⁰⁾におけるゆらぎの影響や、その系の秩序化過程を鈴木のスケーリング解析¹¹⁾を拡張して調べる等、とにかく片端から試みて修士論文を書く。

かくて博士過程にあがる。ここで自身の中で曲がり角を迎える。どうも、この揺らぎ-非平衡路線でやれることは限られている、なかなか「生き生きした」物理を作る道になっていない、という悩みに至る(しかし後から見ると、ノイズにより振動が誘起されるといった確率共鳴のようなことも導いているし、速い変数の消去による揺らぎの伝搬とかは今や細胞生物学でも登場するのだから、その判断は正しかったかどうかはわからない。今や細胞の中での揺らぎを調べる研究が大きな潮流になり、揺らぎが生命らしさの源だといったフレーズを聞くと、多少複雑な気持ちがある。ただし、当時は細胞内でのタンパク量の揺らぎ、といったような測定は全く不可能だったので、理論だけで独走する研究があり得たかはわからない)。

で、カオスに興味を持ち始め、まもなくそれへのめりこむようになる(これについては、拙著、『カオスの紡ぐ夢の中で』¹²⁾を参照されたい)。カオスはダイナミックな「生き生きした」振舞いをする現象であり、それが楽しかった。とはいえ皆と同じ方向を向くのもどうかという、生来の天の邪鬼のために、少数自由度でのカオス系という潮流に掉さして、自然は大自由度の現象だろうから、と、大自由度のカオス現象の研究を始める。しかし、あまりに多くの自由度を扱うのは難しく、「大」といっ

ても、カオスの不安定性を持つ自由度が2つの場合の研究に落ち着く。パソコンの中に、とんぼの目玉のようなアトラクターが形成されていくのを見つけた日のときめきは今でもまざまざと思い出せる(計算機が遅かったから、時々刻々、軌道の動きを実体験できたのがよかったのかもしれない)。準周期運動からいかにカオスが生じるかの様々なパターンを見出して博士論文を著す¹³⁾。調べれば新しいことを見出せる楽しい時期ではあったが、その一方で、準周期からカオスへのルートの研究は、当時欧米でも盛んになっていて、先にこちらが発見しても、向こうの強力なグループに攫われることもあり^{*2)}、なかなか一人で太刀打ちできず、もっと余人が手を出しそうにないことをやらねば、とも思う。

3. ポスドク以降

かくてポスドクになる。幸い、学術振興会の特別研究員に採用されたものの、その頃の学振研究員というのは、任期1年、月収10万円、研究費年10万円という、なかなか寂しい、というかあくまで腰掛けの身分であった^{*3)}。当時はこの他に日本ではポスドクの制度はないし、カオスのような新しいことを研究してはまず助手ポストもないだろう、というわけで、特に行きたかったのでもないけれども外国でのポスドクを探す^{*4)}。

*2) トーラスのロッキングやカオスへのルートに関しては、Kadanoff や Siggia ら強力なグループが研究していた。僕の方は周期が足し算で増える系列を調べ、それほどかぶらずにすんだ。トーラスが倍加してカオスへ至る道については、フランスのグループとかち合ったが、倍加が途中で止まることを示したので、やや注目された。3次元以上のトーラスの存在と、そのロッキングやカオス化については投稿論文査読に時間がかかっているうちに Maryland の Grebogi-Ott-Yorke (GOY) グループの論文が流布した。トーラスのフラクタル化に関しては、同時に出た、GOY の Strange Nonchaotic Attractor (SNA) という魅力的な題名のほうに注目が集まった(一応、後年著された SNA の本には、同時の発見者とはされているけれども)。

*3) 研究費は半年分が10万円だったのかもしれない。学術振興会は、確か、2-3年後に大幅な変革を行い、ほぼ今の研究員制度に変わる。

*4) 最近、海外に行く若手が減ったといって海外派遣助成金を作ったりしているけれど、本当に若手が海外に行くことを推奨したいのであれば、(i) 日本のポスドク数を大幅に減らし、また、できるだけ外国人をとることにする (ii) そこで浮いたお金は大学のポストを増やすことにする。そうすれば、ま

結果、米国ロスアラモスの非線形研究センターのポストに採用された。できたばかりのセンターで、カオスの研究者では Doyne Farmer という人が着任してまもない頃だった。彼の博士論文には、あのとき、Rob Shaw がカオスのことをきかなければ自分はいまヒッピーとともにハモニカを吹いていただろう、それがここに博士論文を書くに至る、これこそ初期条件敏感性やなあ*5)、みたいなことが書いてあり、何となく惹かれるものがあった。Farmer は、当時アメリカのカオス若手のカリフォルニアの4人組の一人。思索的で何となく哲学者風というかジョン・レノンっぽい(?) Rob Shaw, 常に知的カッコよさを漂わす Norman Packard, 元気でやんちゃな感じの抜けない Jim Crutchfield, そしてスポークスマンの役割もこなす Farmer の4人組は、カオスで世界観を変えるぞ、という意気盛んな若手たち(僕よりは少し年上)だった。博士論文にカオスが新世界を開く、みたいな序章を書いて、審査員にアジビラみたいだ、って叱られていた自分にとっては、内心、共鳴を感じる存在だった*6)。

ところで、その非線形研究センターのポストの採用通知とともに、同時期に応募していた、東大駒場の助手の最終候補になる、という知らせを受ける。決まったら半年でポストをやめないといけな。そう特にアメリカに行きたかったわけでもないし、何せ助手ポストはめったになかった時代、これを逃すわけにもいかない。そういうわけで、Farmer に辞退しようかと思う、と手紙を書く(まだeメールなどない時代)。すると、半年

ず(僕がかつてそうだったように)ポストで海外に行かざるを得なくなる。一方で、大学のポストが増えてるので、ポスト後に、大学に採用されやすくなる。さらに教員増のおかげで、着任後にしばらく海外にいても大学教育への支障は少なくなる。かくて、この助成金を使える人が増える。そうしないで助成金だけ作っても画に描いた餅では。

*5) 当時はまだバタフライ効果なる言葉は流布していなかった。なお、関西弁なのは、当時、カオス研究は京都が盛んで、そういう人たちとしばしば話していた影響。

*6) カオスを始める頃からいろいろ相談のつてくれ、ある意味、メンターであった津田一郎さんと飲みに行った折に、カオスが世界観をいかに変えるかの議論になり、全10巻本の計画をしたりしていた。10年後にやっと1冊書くにとどまっている¹⁴⁾。

でもいいからぜひ来い、とのこと。で、そこまでいってくれるなら、と行くことにする。駒場のほうは、渡米の数日前に、内定の通知を受け、結局半年間ということでのポストが始まる。

とはいえ、結局、Farmer と共同研究したわけではなく、院生にテーマを考えて一緒に研究したりしていた。博士の最後あたりから、初心に戻り、大自由度のカオス系(カオスの場の理論?)の研究をするべく、coupled map lattice というモデルを導入し、多くのカオス系が相互作用したら何が起こるかを調べていた¹³⁻¹⁵⁾。皆が少数自由度なら、あまり人がやらない方向を、ということで、こっちに全力を注いでいた。今から思えば当たり前の方向に見えるが、幸せなことに未踏であったので掘れば新しい発見がある時代であった。

で、予定通り、半年で帰国となったけれど、やはり行ってよかったと思う。米国でも有力な著名教授が集う東海岸に行ったのではないので、そういう意味の財産はできなかったけれども、学問の自由さはニューメキシコの突き抜けた青空とともに体感できたし、そのときの知り合いはその後の研究を進めていく上で、有形無形の支えとなった。

助手になって3年半後、今度は Stanislav Ulam フェローというものにしていただいて再びロスアラモスに戻ることにとなる。このフェローに推薦されるけれど、もし決まったら1年来られるか、という連絡を受けたときは正直びっくりした。というのは、このフェローになっていたのはもっと功なり名を遂げた人であったから。実際、そのときのフェローは John Holland という、遺伝アルゴリズムの創始者という大物だったし、まさか、30歳そこそこのペーパーが選ばれることなどないだろうと思っていた。決まったときは、年齢にこだわらない、アメリカ風の人事に感動も覚え、何とか、この高評価に答える研究をせねばと発奮した*7)。

*7) 日本人では、後年、九州大学退官後の川崎恭治教授がこのフェローになられる。もちろん、当時はそのような10年後のことを知るよしもないが、もし統計学の泰斗が後に着かれるポストと知っていたら、ますます畏れおおく感じていただろう。なお、Ulam は非線形研究の様々なアイデアを出した数学者で、logistic map などの写像系でのカオ

その折、カオスを示す要素が全部と相互作用している研究をたまたま始めた。統計力学としては、平均場モデルを調べるのは自然といえば自然な流れだけれど、通常、平均場をしてもさして楽しい現象は期待できない。この場合だと、カオスは小さな差を増幅させるから元来要素の振動の位相をばらけさせ、一方で平均場結合は振動を揃えさせるほうに働くから、平均場結合を強くするにつれて非同期から同期への転移が起こるくらいかな、と思っていた。ところが、要素が異なる振動位相のクラスターに分かれるとか、階層的なクラスターができるかが見つかり、さらには少数自由度で記述できる秩序状態ができては壊れるカオスの遍歴やら謎の集団運動やら、陸続と新現象が見出され¹⁴⁾、激しく興奮する日々を過ごした。この研究で研究所の恩顧に多少は報いられたかと思う。

この研究を行ったときに、同じ規則で動く要素から異なる振舞いを示すグループができてくるのは、同一遺伝子を持った細胞が異なるタイプへと分化する現象みたいだなと思っていた。とはいえ発生物学とはまだ大きな距離もあり、あくまで、隠喩にすぎなかった。さて日本帰国後2年ほどして、伏見譲先生に誘っていただいた研究会で、若い元氣な阪大の助手と出会う。懇親会で盛り上がって話していると、彼は「大腸菌を培養していると、同じ遺伝子を持った菌なのに、元氣なものとそうでないのに分化する、しかも攪拌した液体培地の実験なので菌の位置の違いによるのでもない、なぜだろう。」という。「でも、同じ発展方程式を持った簡単な要素が全部と同じ相互作用をしても状態が分化するのを最近みつけたし、細胞だったら内部で非線形の反応ダイナミクスくらい当然あるだろうから、分化してもいいんじゃない？」これが、四方哲也さんとの出会い、そして生命とは何か¹⁶⁾を探る、今日まで続く、大冒険の始まりだった。

とはいえ紙数も尽きてしまった。途中書き残してしまったことは多々あり、またお世話になった多くの人たちへの感謝を述べないままになり、申

¹⁴⁾ 研究、セルオートマトンの発想、ソリトンの発見に至る Fermi-Pasta-Ulam の研究など要所のバイオニアである。

し訳ないことこの上ないが、このへんでひとまず筆を擱きたい*8)。

4. 十八の君に

小説を読んでいると、ああ、前段のあれが伏線だったのかと思うことがあるけれども、ここまで振り返ってみると、若いときにいろいろ考えていたことは後の伏線だったと思えなくもない。カオスに出会ったときは当然ながら荘子の渾沌を想起したし、生命システムにおいてダイナミクスの中かいらいかに規則が生成されるかという僕自身の主要関心はまさに荘子の投げかけた課題だ。ルシャトリエ原理は、今でも生命システムのロバストネス、進化的安定性、適応、といった一連の研究の背後にある。大学時代考えていた平衡への落ちにくさに関してはこの数年一連の研究を行っている。そして、「安定した秩序状態が続いた後にミクロな自由度の影響がマクロレベルまで増幅されてもとの構造を壊し次の秩序への道が開かれる」というカオスの遍歴は、「革命的時代には個人の影響が増幅さ

*8) 指導教官、研究室の先輩や後輩たちへの感謝は言うまでもないが、他にも多くの方に励まされたり、刺激されたり、議論していただいた。修士の時代から博士1年までは京大基礎物理学研究所で毎年開かれていた、「非線形非平衡」の研究会があり、その後、これは「カオスとその周辺」の研究会となった。(京大数理解析研でも確率過程と非平衡開放系の研究会があった)。その頃は、北白川学舎、という、決して立派とは言えない施設に偉い先生も泊まっていた、夜、色々話させていただいた。特に九大の森肇先生には、確率過程での速い変数の消去を研究していた修士2年の頃から議論していただいた。当時、森先生たちは射影演算子を使ってこの問題を調べていて、僕の発表の後に、この場合は自分たちではこうなるけれど、君のはどうなりますか、とノートを持って議論に来られた。同じ一研究者という姿勢で話されたので、ほぼデビュー戦だった自分は感激した。カオス研究を始めて以降は、当時、物理では京大富田和久研と九大森肇研がその二大中心地だったので、両先生や相澤洋二さん、津田一郎さんを初めとした富田研の方々、その他、池田研介さんたちに、研究会で話を聞いていただくことが大きな楽しみだった。研究会の度に、本質的に新しい現象の発見や概念の提示が多々あって、熱気に満ちた疾風怒濤時代だった。なお、森先生には、「研究者はいつか最初の論文に戻るときが来るから、金子さんも(今はカオスをやっている)確率過程に戻るときがきっとありますよ」と「予言」された。細胞のゆらぎを調べる上で確率過程を用いていると、予言が成就してしまったのかなあと思う一方、揺らぎと適応や進化を関連づけるというのは当時全くなかった発想なので「戻った」わけでは、と反論してみたくもある。

れそれが次の安定した時代を生んでいく」という過程として歴史を理解しようとしていた十代の自分に伝えてみたくもある（高校生の自分はそんなことではきっと満足してくれないだろうけれど）。

しかし、それはあくまでも後から見た話である。もちろん、そうやって、後から伏線に思えるようになる、というのは物理系にはない、生命（脳認知）系の特徴かもしれない、もし後年、そうした構造がいかに現れるかの理論が作れば、そのときにこの文章を書かされたことは伏線だったのか、と振り返られるかもしれない。

さてしばしば、自分は理系向きなのか、文系的ではないのかと悩んできたことはどうなったのだろうか。今になってみると、数理的な後付けや実験もなしで、文章だけで好き勝手なことを科学っぽく表現されるのには、だんだん耐えられなくなってしまった*9)。しかし、それに伴って、(本文でもわかるように)文章も下手になってしまった*10)。まあ、研究室からすばらしい作家が出ていることをもって少しだけの慰めとしたい。

以前、物理学会誌での座談会*7)でも述べたことだけでも、研究をしながら時に自問するのは、十代終わりの頃の自分に胸をはって、こんな面白いことをやっているよ、と語れるかどうかだ。あの頃夢想していたことにどこまで近づけたのだろうか。すべて思い描いたようにはなっていないのは無論のこと、むしろそのならなかった部分の意外さに、微笑笑と、しかし、こっそりと誇りを持って語れるようでありたいと思う。

参考文献

- 1) H. Simon, *Models of my life* (1996) (訳: 学者人生のモデル)。
- 2) シュレーディンガーの「生命とは何か」から Prigogine

*9) もちろん哲学を軽視しているのではない。哲学は言語による思考実験を突き詰めていった到達点として高く尊敬している。ただアリストテレスや荘子が言っていたようなことを脳科学として喧伝されるとちょっと…。

*10) 理系は大学にいかねば身に付かないけれど文系的な素養は何とかなるだろうとか高校のときに不運にも思ったけれど、それが間違いだったのは、日本語の依頼原稿を書こうとしてひどく稚拙な文しか書けなくなって愕然としたときに十二分に認識させられた。

の散逸構造⁴⁾、Turing パタン、そして現在の研究へと至る顛末は、「生命とは何か 1944 vs 2003」として書いた(数理科学: 特集「シュレーディンガー」, 555, 45-50) 2009。

- 3) 大沢文夫, 寺本英, 斉藤信彦, 西尾英之助, 現代物理講座『生命の物理』(岩波書店, 1972)。
- 4) G. Nicolis, I. Prigogine, *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations* (1977) (訳: 散逸構造, 岩波書店)。4年生のときはまだ原著が入手できていなかった。M1のときに Glansdorff と Prigogine の *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations* (1971) の読書会を始め、途中で上掲書にスイッチした。
- 5) 小松左京, 『継ぐのは誰か』, (ハルキ文庫)。復刊にあたり、解説を書かせていただいた。
- 6) H. Haken, *Synergetics* (訳: 協同現象の数理)。
- 7) H. Fröhlich, *Collective behaviour of non-linearly coupled oscillating fields with applications to biological systems. Collective Phenomena 1: 101-109* (1973)。
- 8) H. Risken, *The Fokker-Planck Equations* (Springer, 1984)。
- 9) K. Tomita and H. Tomita, *Prog. Theor. Phys. 51, 1731* (1974)。
- 10) Y. Kuramoto and T. Tsuzuki, *Prog. Theor. Phys. 52, 1399* (1974)。
- 11) M. Suzuki, *Adv. Chem. Phys. 64, 195* (1980): この手法は非線形ランジュバン方程式を非線形変換と拡散過程という2つの手続きに分離して扱うことにある。後年、導入する coupled map lattice でも、意識せぬまま、カオスを生む変換と空間の拡散の2つの手続きを分離して行っていたことにだいぶ後になって気づいた。
- 12) 『カオスの紡ぐ夢の中で』(1997)。2010年、ハヤカワ文庫により復刊。
- 13) K. Kaneko, *Collapse of Tori and Genesis of Chaos in Dissipative Systems* (World Sci. Pub., 1986, 1983年の博士論文に基づく)。
- 14) 金子邦彦, 津田一郎, 『複雑系のカオスのシナリオ』(朝倉書店, 1996)。改訂英語版は, *Complex Systems: Chaos and Beyond*, Springer, 2001 (K. Kaneko and I. Tsuda)。
- 15) K. Kaneko, *Theory and Applications of Coupled Map Lattices*, edition and Chapter 1, (Wiley) 1993。
- 16) 『生命とは何か (第2版) —複雑系生命科学へ—』, 東京大学出版会 (2009, 初版は2003)。増補英語版は *Life, An Introduction to Complex Systems Biology* (Springer, 2006)。
- 17) 日本物理学会誌, 座談会「物理学の明日」, 56 (2001) vol 9。

(かねこ・くにひこ, 東京大学大学院総合文化研究科)