

1. 惑星科学としての力学・気候学

林 祥 介*

1. 「自明」な展望

地球科学あるいは惑星科学の将来展望においては、いわば、自明解とでも言うべきものがある。よほど革新的な技術展開がおこらない限り、観測プロジェクトのライフタイムは短くても数年、まとまった描像になるまでデータが蓄積するには10~20年というのがざらであろう。したがって、今後どうなりますか?という問に対する答えを得るには、現在動いている、あるいは、動こうとしているプロジェクト関係者に概観してもらうのがいちばん手っ取り早い。100年という世紀のオーダーはさすがに無理としても、10~20年という程度であればナウキャストの範囲内ということができるとはならないだろうか。

惑星探査においては、この傾向はより顕著である。惑星を探査するべく適当なデバイスを現場に到達せしめるには、実働時間でも数年~10年かかる。構想段階からデータが整理され収穫期に至るまでのフルスパンを勘定にいればより長い時間が必要となろう。現在、日本が主体のプロジェクトとしては、すでに宇宙空間にあり遅々として火星に向かっていく「のぞみ」、遅れに遅れている月の構造探査計画(Lunar計画)、小惑星サンプルリターンを目指すSELENE (Selenological and Engineering Explorer) 計画、実行計画にのせられるかも知れない金星大気圏・外圏探査などなどがある。これらが自動的にこの何年かを決めており、その結果がその後の10~20年を拘束してしまう。

2. スポンサー問題

幸か不幸か現状においては惑星探査の主流は米国であり、したがって、科学としての惑星探査のゆく末を決めてしまっているのは米国の研究企画者である。彼

らの見たいものがすなわち今後10~20年で見える(かも知れない)ものということになる。とすると、日本のプロジェクトの成否が科学としての全体の流れに大きな影響を及ぼすことはあまりないことになるが、それではこのグローバリズムの時代、日本的惑星探査は生き残れないことになってしまう。国際競争力のない産業は淘汰され、国際競争力のあるセクターに投資はまわされる。このことは困ったことに学問業界においても例外でないのが昨今のトレンドである。

したがって、定義によって日本の惑星探査もそれなりのインパクトあるものでなければならぬのだが、たまにしか探査できないグループがインパクトを追求するのはなかなかしんどい。今まで考えもしなかったような事実のキャッチが予測できるアイデアが提案されない限り、莫大な費用のかかるプロジェクトを博打に使うわけにはいかない。探査すべきものは、これまでの科学的世界観にしたがった惑星の進化と構造を明らかにし、ひるがえって地球を考える視点を与える何かでなければならず、何がどう観測されてきて今何が足りないかをきちんと踏まえたものでなければならぬ。そして、それにたずさわる者は、そのような新しい観測の実現可能性を判断できる、探査自体の経験と感の蓄積を持ったものであることが必要となる。したがって、経常的に探査が推進されていないと、そもそも探査をすすめるグループを維持すること(経験と感を伝承蓄積すること)が困難になる。

さらなる幸か不幸な事態としては20世紀において惑星探査を進めていた大きな原動力がその世紀末に失われてしまったことがある。冷戦構造の崩壊である。米ソ競争時代の宇宙における覇権争いが、惑星科学においては大きな収穫をもたらしてくれたことはまちがいない。かの時代においては惑星探査の時定数はもっと短かったのである。ソ連の崩壊とともに原子力(核)と宇宙には逆風が吹くことになった。80年代終りには

* 北海道大学理学研究科, shosuke@gfd-dennou.org

© 2002 日本気象学会

どこまでNASA(米国航空宇宙局)の予算カットが進むのかと恐怖されていたが、90年代は米国の景気がよく、一人残った帝国の威信をかけてか、火星探査、外惑星探査が続けられた。米国の高景気が終わった今日、今後もこのペースが維持されるかどうかは疑わしい。実際、外惑星を探査するCassini(<http://www.jpl.nasa.gov/cassini>)以後の巨大探査プロジェクトは現在実行計画にはない(最近の火星シリーズに代表されるようにNASAは1プロジェクトのコストをこれまでの1/10ぐらいに削減し、早い、安い、...で迫っている)。これから先は、米国の威信を維持できる最低限ペースで事は進行するだろうと想像される。ペースダウンしてくれることは、国際競争という見地からいえばキャッチアップしやすくなって参加の機会も増えるので我々辺境の科学者には望ましいわけであるが、そもそも、新しい事実の蓄積が減るので学問の流れを維持することは困難になる。

このような状況下においては、いわゆる国際協力が要請される。米国研究企画者といえども自分たちで探査の全体を遂行する国内説得力がもはや無い。計画の正当性を主張し、さらには足りない予算を調達するためには諸外国の研究者・予算当局を巻き込まなければならない。たまたま、日本においては80年代後半のバブル経済下において、貿易黒字の代償としての国際貢献が推進され、国際科学プロジェクトに参加することが予算当局によって後押しされて来た。残念ながら、本来備えているべき科学的基盤力を伴わない国際協力を行うことは科学者には苦しいものがある。とりあえずの成果は、彼の地の蓄積レベルの上に共有物として得ることも可能であろうが、もともとの基盤がないので次の展開を生んで行くような蓄積にはなりにくい。いわゆるリバースエンジニアリングとは逆のパターンであり、結局、お金だけむしりとられて終ることになる。ましてや財政破綻が見えかくれする21世紀初頭の日本においては、自らの科学的動機づけに根ざしていない外来の国際協力は早晩財政的に支援不可能となることはまちがいない。

3. 収穫低減の法則

収穫低減の法則(Horgan, 1996)は例外無く我々の分野にもあてはまる。わかりやすくいえば、二番煎じは評価されない、である。一度見つけてしまったものはもはや既存の知識であって、おなじことをいくら独立に見つけても新しい知識ではなく、科学のグローバ

リズムパラダイムでは価値を認められない。惑星探査においても例外ではない、最初に行った連中は写真を撮って並べるだけで、偉大な成果、であるが、次に行く連中は明快で説得力のある理由(面白いと思わせるアイデア)がスポンサーに対して(そして多分自分自身に対しても)必要になる。だんだん説得力ある理由が無くなってくると、もはや趣味人の活動とされ、公的なサポートは他の分野に回される。

やっかいなことに、惑星探査は非常にコストと時間がかかるので、チャンスは何回も得られない。コスト対収穫の評価に関しては厳しい目にさらされることになる。趣味で惑星探査をやるわけにはいかないから、高エネルギー加速器と同様、何か現世ご利益のある理由を見つけないと、継続は難しくなる。科学的必要とは関係なく、政府関係が急に火星に人を送りたくなる、とかがなければならぬ。

冷戦構造崩壊の後の覇権競争は、情報、生命、微細工学(ナノテクノロジー)の分野に移っている。与えられた投資に対する収穫がもっとも大きく、しかも現世ご利益が直ちに期待される分野であるからだ。膨大な投資による産業的推進と特許取得競争とは科学のあり方を急速に変容させつつある。

我々の分野もこれらの分野との関係においてしかるべく変容して行くだろう。たとえば、ダウンサイジングが進展し、探査機器の質量・サイズが1/1000、昆虫のようなものにもなれば、一度の探査に1000個の測器を搭載、惑星上に展開することによって、時空間的なデータの取得が可能となるだろう。火星や金星の大気力学を精緻にし、これらの大気の大規模モデルの検証を行うためにはそれぐらいの数の流れ場の観測が欲しいものである。地球では1979年FGGE(First GARP Global Experiment; GARP(Global Atmospheric Research Program))を行ってはじめて全球の観測体制が整備され本格的な数値予報体制が完成した。おなじこと、すなわち、循環場の全球的な状況の把握を火星や金星、あるいは、木星でやろうとすれば、似たような密度の観測網が欲しくなる。日々の天気予報をやるというのではなく、大気大循環の平均場とその維持に関与しているであろう乱流構造・波動構造を掌握するために、である。

4. なぜ探査か

気学や気候の話はそっちのけで、長々と探査継続に横たわる問題点をならべてみた。探査を先頭に持って

来たゆえんは、要すれば、我々の科学的想像力と記述力がなかなか現実をこえることができない、ということにある。観測結果がなければはじまらない、というのがこれまでの現状である。

我々の理論的記述力（計算的予言能力）の精度が非常に高ければ、惑星大気の観測をするまでもなく、火星はこうなっているはずであり、金星はあーなっているはずだ、という予測を行うことができ、逆に、その予測が新奇なものであれば、それを確認するべく新しい観測を行うという動機にもなる。が、そんな能力は現状ではない。

COWBOY BEBOP (SUNRISE Inc., 1998) というアニメでは、金星や火星は言うに及ばずガニメデでさえテラフォーミング(惑星大気環境を人為的に改造し、地球大気環境に近い状態、すなわち、人間が居住できる環境にすること)されているわけであるが、それを数値計算で検証する(必要性はさておき)ことは現状では難しい。火星の過去の気候が現在よりも温暖でありえたか否かという問題を扱うことは十分難問であるし、そもそも、現在存在する火星 GCM ではグローバルダストストームを起こすこともできない。大気中にダストが巻上がっていればダストが巻上がるがダストが巻上がっていなければ巻上がらない。だからダストが少ない状況からダストでおおわれた状況に遷移できないというのが現状である。

いずれにせよそのような状況下であるから、観測という「答え」を見ていないとなかなか考えが前に進まない、下手をすると何を考えたらいのかさえ不明瞭になってしまう。あるいは、第三者に対して当該問題の考察を考え(続け)る理由を説得できなくなってしまう。いわゆる理論的予想をもって(わかりやすい)問題意識を呼び出すことがなかなか難しいからであり、逆に、観測を持っていると「なんでこうなっているのかわからんのですよ」型の説明ができる。

これは、実は惑星科学自身の存在理由のひとつでもある。惑星を研究することを介して、我々は我々の住む環境、地球、を考察理解するための視点あるいは基準点を得ているのである。火星や金星の気象や気候がどうなっているのか、なんでそうなっているのかを理解することは、同時に地球の環境がどういう条件下で現在のようになっているかを理解することでもある。地球に関して理解している、と知っていることを火星や金星、あるいは、外惑星大気のために適応してみてもその理解をテストすることができる。地球には準二年

振動と言うのがありますが、火星ではどうでしょう、金星ではどうでしょう、木星ではどうでしょう。無いとすればなぜでしょう。地球の準二年振動はそのうち止まったりしますか、などなどの問題がそういったものたちである。

地球が孤立無縁、火星や金星や木星や…が無かったとしたら、地球大気の循環構造に関する理解を試すパラメータ研究を行うことはあんまり許容されなかっただろう。なんで、そんなこと気にするの、そういうこと研究して何の意味があるの、という無理解(?)にぶつかるからである。いくつかの惑星大気が存在してくれることにより、それを足掛かりとしてパラメータ空間を旅することが許容される。形而上気象学・形而上気候学のはじまりである。

実は、わざわざ惑星探査に乗り出さなくとも、私個人には伝統的問題がすでに山積みで、なかなか手がつけられなくて困っているくらいな状況にある。たとえば、地球の自転角速度が違っていたら大気循環はどうなっていたかとか、水が無かったらどうなっていたかとか、自転軸の傾きが違っていたらどうなっていたかとか、太陽定数が違っていたらどうなっていたかとか、地球の半径が木星ぐらいあったらどうなっていたかとか、大陸の分布が違っていたらとか、…

これら形而上気象学・形而上気候学の問題は、実は昔からいろいろな人がなんとなく考えてきている面白そうな問題なのではあるけれど、「仕事」のレベルまで持っていくことは難しい問題でもあった。

形而上気象学や形而上気候学を実践するのに必要な能力は、現実の火星や金星の大気循環予言能力とあまり変わらない。勝手な設定の惑星の気象や気候を自信をもって計算できるくらいなら、当然現実の火星や金星や…もしかりであるはずだ。そのような能力が現在ないところがそもそも問題であったわけであるから、勝手な設定で行った計算の正しさをどうやって検証するのか、は難しい問題となる。まして、その計算結果が意味を持つてくるためには、多数のパラメータで実験を行ってその中に解の振舞がなんらかの特異性を示すことを発見、全体としての解の構造を記述できるようにならなければならず、膨大なパラメータ計算処理が要求される。

いろいろな設定での計算を実行することにより、たまたまあるパラメータセットで計算された結果の本当らしさが理解される。とある計算を1つだけ実行すればいいのではなくて、たくさん初期値からスタート

した計算を同時に実行して、いわばエラーバーのついた計算結果を得る。あるいは構造安定性を確かめた結果を得る。さらには、さまざまなレベルでの単純化を施したシステム、たとえば順圧大気とか浅水大気とか、での経験をつみ、簡略なシステム（あるいは方程式の解析的扱い）で得られている既存の力学概念パラダイムと結合させる。このような重層的手順を踏んではじめて計算結果のもっともらしさを確信することができるのは気象学のこれまでに他ならない。

5. スパコンの使い方、必要性

仮想的な状況を計算機の中で実現し、それを解析することで、地球流体力学的知見を得、その知識を持って実際の気象・気候を記述する、あるいは、さらなる数値モデルの設計に役立てる、簡単順圧システムから複雑 GCM へさまざまなレベルでのモデル階層を用意し、方程式とその解として定義された力学概念と結合させる。こういった活動は20世紀終り1980年代後半、大型汎用計算機がスーパーコンピュータと呼ばれるようになったころには実行可能になってはいた。

しかしながら、次の3つの理由により、このような研究は実際にはなかなか実行困難であった。(1) スーパーコンピュータが、形而上気象学のような怪しい目的のために自由に使える環境にはなかなかないこと（とくに米国じゃ無理）、(2) ちょっとした計算であってもパラメータ空間をなにかがしカーベイしなければならぬためデータは膨大になり計算結果の表示や解析が容易でないこと（データの嵐問題）、そして、(3) モデル階層を用意し、自由に行きかうことがそれほどやさしくは無いこと、である。

スーパーコンピュータといえ、スーパーな成果がえられるスーパー研究でなければなかなか利用できない。惑星探査とまではいわないまでもそこそこのお金がかかるので、それなりに確実な成果が期待され、あるいは、必要性が明快で、したがって、予算措置されるものでなければならぬからである。いまどきのパソコンの値段に比べると、一介の研究者では利用を躊躇してしまうような計算機使用料が課せられる。スーパーコンピュータの利用がスーパーな研究に制限されていることは本来その将来にとって決して良いことではない。未熟な利用者（プログラマ）をプロに育てるチャンスが提供されないことと、スパコン利用の裾野が広がらずスパコン開発の動機と支持が失われてしまうからである。地球シミュレータが目指すような超ス

パコンとダウンサイジングされた結果としてのパソコン環境の間をつなぐ普通のスパコンがもうすこし気楽に利用できるようになっていないと、スパコンの開発維持ができないし、ひるがえって地球流体計算をすすめることもできなくなる。

データの嵐問題は、衛星画像処理等々に携わっている人達には昔からのテーマであるけれども、もはや、単なる理論計算を行おうとする人達にとっても避けては通れない問題になろうとしている。2次元数値計算のアンサンブル実験（たとえば石岡ら（1998）の T681 の球面順圧モデルによる2次元球面乱流散逸実験）はそこそこのデータ量で実現させることができるし、結果をながめることも何とかなる範囲でおさめられる（無理矢理おさまるようにする）。しかし、3次元となると莫大な根性が必要となり、それなりのウィザードでなければ実行することすら困難である（たとえば豊田ら（1998）の T42L16 の3次元モデルによる水惑星アンサンブル実験）。我々の関係者は「クリックすれば絵が書けるバイナリ多次元数値データ」をキャッチフレーズに、データと表示情報との同時格納、netCDF を介することによるプラットフォーム依存性の吸収、データ間のすりあわせの自動化などなどに取り組もうとして来た（地球流体電腦倶楽部 davis プロジェクト <http://www.gfd-dennou.org/arch/davis/>）が、このような試みが実を結ぶか否かはまだまだこれからである。

モデル階層を用意する問題は単に複雑度レベルの異なるモデルを用意すれば解決するのではない。それだけでは理論的考察を行うのに効率が悪すぎる。複雑度レベルの変更や計算プラットフォームの変更が容易にできるようになっていなければならない。スパコンは通常リモートプラットフォームであるから、データはネットワーク透過な交換が確保されていなければならない。並列計算機においては計算機内のデータ交換がスムーズに提供されなければならない。モデルはいちいちリコンパイルしなくとも動的にサイズの変更、部品の着脱ができなければならない。このような使い勝手のよい道具ができてようやく、ちょっとした計算テストから重たい高分解計算まで、ちょっとした順圧モデルから複雑な GCM まで、自在にとびかかって試行錯誤できるソフトウェア空間が得られる。

このような数値ソフトウェア、データスキーマの設計と実装には、それなりの情報技術パラダイムを習得した使い手の参加が必要であり、そのようなタイプの

人材が養成されることが期待される。通常、スーパーコンピュータあるいは並列計算機といえ、その能力を最大限に使ってできるだけ大きな容量の計算を行う、あるいは現実をできるだけ忠実に表現しているであろう（複雑な）素過程の山を導入して計算を行う、というような方向の利用の仕方を想定しがちである。しかし、形而上気象学・気候学的利用においては、むしろ、パラメータスキャンや初期値スキャンのほうが重要になるので、並列化をパラメータ空間や初期値空間に割り当てて、一挙にアンサンブル平均をとるなどの方向を模索するべきであろう。スーパーコンピュータの能力を利用して楽して大量の計算を行い、余った時間はデータの構造解析（要するに結果を眺めること）を行うことに持って行くべきである。

6. 知見情報の整理：数値計算から情報装置へ

20世紀は、物理と称される、万物の構造を理解し認識を再構築する時代であった。その真骨頂は、納得すること（理解すること）が直ちに新しいことを生み出すことにつながったことにある。しかし、今や、個人が納得することは必ずしも人が新しいと評価してくれるような何かを生み出すことにはつながらなくなりつつある。古き良き物理学は、自然現象を徹底的に細分化して分析し、そこに、簡単な、あるいは、より正しくは、少ない数の数式で記述される基礎法則とよばれる構造とそれを構成する変数としての物理量を見出す；それに成功すれば、細分化し近視眼的になっていたはずの認識は、その法則と物理量という概念をもとにして、それらを見出した当該対象のみならず、類似構造をもつ自然現象のすべてを同時にかたる言葉として逆転勝利をおさめることができる。そのようなからくり、一をもって十が知れる、をもって発展増殖してきたものであったと言える。

この手順の幸せなところは、(1) 基礎法則を再構成すれば、現象を再現、予言する道具となる、(2) 共通する基礎概念を介して諸現象を語れる、すなわち、理解する言葉となる、にある。再現・予言する道具と記述・理解する言葉とが非常に近い位置にあったところに物理学の幸せがあったわけである。このような物理学的手法は自然現象を語るすべての領域に侵略し開化したので、これをもって「物理帝国主義」などとよばれる。

気象力学は、気象、気候、あるいは、惑星大気現象からその原理となるメカニズム＝力学を抽象する学問

分野として存在してきたわけである。この意味で気象力学は道具としてよりも、理解するための言葉としてその存在のより大きな意義が置かれてきたといえよう。

が、すでに感じられているように、数式を介した理解をもってむねとする物理学的記述力には以前のような威力はない。細分化された対象を分析しても、統合できるような共通語をつくるのが段々難しくなってきたからである。

少数の数式と概念で世界を記述し掌握する、という物理学の野望は現在では情報科学に引き継がれようとしている。もちろん、それが物理学のように成功するかどうかは不明である。情報機器の進歩に対応してあらゆる分野で行われている活動は、これまでの知見を整理し蓄積する形態を探ることにある。少数の数式と概念にまとめあげることが出来ないのなら、それはあきらめて、もはや機械の力でもってまとめあげる。これを新博物時代という。

これまでの科学では、新しい知識、知見を得ることが仕事であった。しかし、新博物学では、必ずしも新しい知識、知見を得ることのみが目的のではなく、既存の知識をどのように並びかえる、整理する、リンクするかを考える、既存の知識のならびかえ自体が新しい知識である、というパラダイムの転換がある。その発想の原点としてはマンハッタン計画のリーダーの1人であったBush (1945) が有名である（あるいは歌田、2000参照）：

人類にとっての真の挑戦は原子をさらに細かく調べたり生命の複雑さを探求したりすることではなく、科学技術が氾濫させる情報のよりよい管理方法を発見することだ。

新しい知識＝情報の断片を生産することは収穫が少なくつまらないが、既知の情報を組み合わせることは新しい、というわけである。

これはそれぞれの分野で今後やらなければならない重要課題ということになる。業界の知見を満載したGCMのような数値モデルの構造化、オブジェクト化は言うに及ばず、地球流体力学のような教養概念も昔風の教科書ではなく、新しいメディアを使った情報提供・認識実験の対象となる。数値計算、シミュレーションの道具としてのGCMから、我々が何を知っているかを聞けば答えてくれるGCMへの変貌である。ただでさえいろいろな過程が導入されて複雑になっているGCMに対し、どういうパラメータリゼーションで

ういうパラメータ値を使っているのかその根拠は何か、などをモデルに聞けば答えてくれるようなそういう賢いGCMが作られていく必要があるのではないだろうか。

7. いろいろな気象学・気候学へ

惑星の気象学・気候学といういかにも明快な対象を持つ(地球の)気象学・気候学の自然な延長での応用分野、という言い方ができるけれども、別の発展の仕方として、手法としての気象学というものがあるのではなからうか。対象は自由に考えていい。

たとえば、地球中心核の気象学・気候学、回転球殻の熱対流で、ちょっと変わった鉄の雨が降って電気(磁気)が起こる。あるいは、より気象っぽいものとしては、原始惑星系星雲の気象学・気候学、太陽系の惑星たちに至る、塵の生成から微惑星の形成まで。要すれば雲物理と放射対流。気象力学は要すれば老舗、地球流体力学の名家、家元、元祖であるから、その経験と手法はいろいろな分野に応用されてしかるべきである。せつかく先人が言語化したのだから。

8. 科学の御利益

科学のグローバリズムに対して、反グローバリズムの立場を最後に主張しておこう。科学(理学=純粋科学、応用科学ではない)とは何か、を強引に一言でまとめれば、私は誰でここはどこかを理解すること、であると言えよう。そして、そのために事物を集め言葉を作っていくことが実際の日々の行いである。要すれば、哲学、であって、それ自体はいわばどうでもよい問題であるということもできる。しかしながら、これまで(特に20世紀において)は、純粋科学的な意味での何か新しいことの発見発明=フロンティアとその開拓が、結局、現世ご利益=国富・国力の増強につながったので、国民国家(民族国家)というスポンサーがついてきてくれていた。純粋科学の現世(国家的)ご利益は大きくわけて次の2つである。

●直接的利益:文字通り役に立つ知識を提供する。

●間接的利益:物を考える言語を作る(鍛える)。

直接的利益は、20世紀における物理学の成果を考えればわかりやすい。間接的利益のほうは多少わかりにくいかも知れない。第一言語(人々が普通にしゃべっ

ている言葉)で何をどこまでどの程度精密に考えられるか、という問題である。あるいは、第一言語でどのレベルまでの教育や実務が行なえるか、と言っても良い。少なくとも明治時代の日本の人達はよく理解していたのであろう。第一言語と高度思考・実務言語が切り離されてしまっている国家では、国富・国力の増強は難しい。

「役に立たない」学問といういい方をするところがあるが、これは、直接的利益が得られにくい、という意味でなければならない。間接的利益、すなわち、第一言語を鍛え、物事を精密/高度/広範に考えられるようにしてあげる、という役にも立たないのであれば、税金で養われている理由はなくなる。逆にいうと、第一言語の向上に結び付かないまま終わっているのではスポンサーの御意向に答えていない、ということになる。

科学の成果が普遍的である(世界の誰にでも通用する)ということと、科学の成果を特定民族の言語体系にインストールされるということとは全然別のことであることに注意しなければならない。本来、言葉を介さない記述、数学、だけがこの違いをあまり意識しないですむのである。今のままグローバリズムと英語化が進むのだとすると21世紀中葉にはこのことの意味が明らかになるに違いない。

参考文献

- 歌田明弘, 2000: 本の未来はどうなるか. 中公新書, 227 pp.
- Bush, V., 1945: As we may think, Atlantic Monthly, July, 1945, 101-108.
- Horgan, 1996: The End of Science, 竹内薫訳, 科学の終焉, 徳間書店, 490 pp.
- 石岡圭一, 山田道夫, 林 祥介, 余田成男, 1999: 回転球面上の減衰性2次元乱流からのパターン形成, <http://www.nagare.or.jp/mm/99/ishioka/index-ja.htm>
- ながれ, 18, ながれマルチメディア.
- SUNRISE Inc., 1998: COWBOY BEBOP
- 豊田英司, 中島健介, 石渡正樹, 林 祥介, 1999: 熱帯大気の暖水域に対する応答: アンサンブル水惑星実験による時間発展の抽出, <http://www.nagare.or.jp/mm/99/toyoda/index-ja.htm>
- ながれ, 18, ながれマルチメディア.