

## 第4章

# シミュレーションと科学-SSC の事例から

平田光司

hirata@soken.ac.jp

教育研究交流センター/加速  
器科学専攻

### 4.1 はじめに

シミュレーションは現代社会を支える重要な「技術」である。ロケットなどの大型装置の設計にあたっては、試作によるテストは費用と時間がかかりすぎるので、かなりの部分を大規模シミュレーションで置き換えてしまうことが多い。原子炉の安全性などもシミュレーションによって「証明」され認可もされる、ということになっている。

基礎科学においても、シミュレーションは（理論物理、実験物理に次ぐ）「第3の物理—計算物理」という言い方に示されるように、実験不可能な現象を解明するための強力な武器となっている。ある仮説に基づくシミュレ-

ションから、多数の観測結果が再現されれば、その仮説は検証されたと言ってもよいだろう。新たな観測結果の予測にも成功すればなおさらである。複雑な現象に対する仮説の検証には、シミュレーションに積極的な意義がある。しかし、試作、実験がシミュレーションによって置き換えられるわけではない。

本論考は、SSC（超伝導超大型衝突型加速器）計画のケーススタディをもとに、シミュレーションというもののありかたについて考察するものである\*<sup>1</sup>。

## 4.2 SSC 加速器

SSC 計画はアメリカ高エネルギー物理学の中心的な計画として、83億ドルの総予算で1991年に加速器の建設を始め、すでに20億ドルが支出されていたにもかかわらず、1993年11月、議会によって存続が否決され、中止となった。その深刻な影響は今も続いている [4]。

高エネルギー物理学とは、物質の根源的な存在形態（素粒子）を加速器を用いて実験的に研究する分野である。加速器で電子、陽子などを高エネルギーに加速し、衝突させて高エネルギー素粒子反応を起こさせ、それを特別に設計された装置（測定器）で観測する。これらの装置は巨大なハイテク設備とも呼ぶべきもので、その建設には多くの研究者による長年の研究、作業が必要とされる [5]。費用も莫大なものであり、例えばトップクォークの発見を主な目的とし、高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）で1981年から1996年まで行われた TRISTAN 計画の総費用は約2500億円と見積もられる [6]。

---

\*<sup>1</sup> 文献 [1] に加筆修正した。また、SSC についての論考 [2, 3] も参照されたい。

SSC は周長約 8.7 キロメートルの地下トンネル内に強力な超伝導磁石を並べ、2.0 TeV (テラ電子ボルト) の 2 つの陽子ビームを蓄積し、それらを衝突させる計画であった。陽子源で作られた陽子を、途中に何段階もある中間的な加速器で少しずつ加速していく。メインリングに入射するエネルギーは 1 TeV とされていた。メインリングでも更に加速して、最終的には 2.0 TeV に到達する。それから先は加速せずに、陽子ビームをリングの中でただ回し、衝突させ続けるわけである。

SSC の最初の具体的設計は Central Design Group (CDG) によって行われ、1986 年に概念設計報告書 (CDR) が提出された [7]。この報告で最も重要な部分は建設費の見積もりであり、総費用は 5.3 億ドルとされた。1987 年にレーガン大統領によって計画が認可され、1989 年にはテキサスに SSC 研究所が設立された。建設予定地が決定してから、SSC 研究所では加速器計画の再検討を行い、結論は 1990 年に膨大な報告書として発表された (Site-Specific Conceptual Design, SSCD) [8, 9]。CDR におけるデザインとの大きな相違点は

- 入射エネルギーを 1 TeV から 2 TeV にあげ、
- 加速器の内径 (口径) を 4 cm から 5 cm にあげた

ことである。このため、SSC の総予算は当初の 5.3 億ドルから 8.3 億ドルへと大きく上昇した。

入射エネルギーを 1 TeV から 2 TeV にあげるためには入射用の中間的加速器をより充実しなければならず、大きなコストがかかるのである。また、加速器には粒子の軌道を制御する偏極 (2 極) 磁石のほかに、ビームを収束するための 4 極磁石が使われているが、少しずつエネルギーの異なる粒子を同じ様に収束するために 6 極およびそれ以上の多重極磁石も使われている。SSC の場合、これらの磁石はニオブ-チタン電線を巧妙に巻きあげたもので、超伝導状態におかれている。その状態を安定して保ち続けるために、冷却装

置が必要となる。磁石を大きくすれば当然コストも上がるわけである\*2。

連邦議会では、この予算膨張分は国際協力などによってまかなうことを要求し、日本へも協力要請が行われた。しかし国際協力が思うように進まず、また研究所の運営にも問題が指摘されるなど、計画中止を求める声が高まり1993年の中止決定にいたる。

### 4.3 加速器ビームのカオス

1986年のCDRから1990年のSSCDの間に何が起ったのか？それを理解するには、加速器設計の基本的概念を理解しなければならない。

加速器では各種磁石による磁場によって荷電粒子を制御する。各磁石ではLorentz力によって粒子の運動が決定される。簡単のために粒子の運動を、横方向（基準粒子の進行方向に垂直な方向で地面に平行な方向）の運動だけ考えることとし、基準粒子からのずれを座標  $X$  で表そう。これに共役な運動量を  $P$  とする。粒子が磁石を通過すると

$$(X, P) \rightarrow (X', P') = f(X, P),$$

のような変化を受ける。ここで  $f$  は一般に非線形な関数である。このような変換を次々に重ねて、リングを一周するとやはり

$$(X, P) \rightarrow (X', P') = F(X, P),$$

のような非線形変換となる。このようにして、リングを一周した時の粒子の  $(X, P)$  を毎周  $(X, P)$  平面上にプロットしたものをポアンカレプロットと呼ぶ。(図1(左)参照)。一周写像のポアンカレプロットは(まともな加速器なら)原点の近くで図1(右)のようになる。 $(X, P)$  は適当に規格化されている)。これは「積分可能な」例であって、一粒子のポアンカレプロットが一本

\*2 それ以外に、CDRでは楽観的に出した数値(実用電流と臨界電流の比など)をより現実

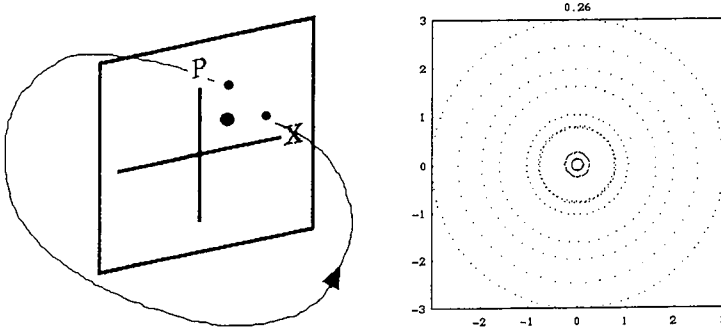


図 1: (左) ポアンカレプロット：ある  $(X, P)$  から出発した粒子を、それが観測点  $O$  に来るたびに相平面上にプロットして得られる図。(右) 振幅が十分小さい時のポアンカレプロット。いくつかの、別々の初期値に対して描かれたものをまとめている。

の曲線に乗っている。つまり、 $X$  と  $P$  の間にある関係  $g(X, P) = 0$  があって、 $g$  が運動の定数となっている。自由度  $2N$  の系に  $N$  個の保存量があれば積分可能系である。積分可能系であれば、任意の初期値に対してその後の軌道、 $(X, P)$  を解析的な関数（逆関数、既知関数の積分を含む）として表現できる。つまり予測可能である。たとえば、図 1（右）のような運動は一周ごとに

$$\begin{pmatrix} X' \\ P' \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X \\ P \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} \cos \mu & \sin \mu \\ -\sin \mu & \cos \mu \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

であり、 $n$  周めの座標は

$$\begin{pmatrix} X' \\ P' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos n\mu & \sin n\mu \\ -\sin n\mu & \cos n\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ P \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

と「解析的」に与えられる。

しかし、良く知られているように [11]、ほとんどの力学系は積分不能であり、上記のような表現を得ることはできない。簡単な系なのに積分不能な例

---

的なものにしたこともコスト上昇に反映している [10]。

として、もともとのリングでは運動が (4.1) 式で表されるが、一箇所に新たな非線形力加わった場合を考えよう。非線形力としてはリングの一箇所に挿入された8極磁石を考える。8極磁石における写像は

$$X' = X, \quad P' = P - cX^3 \quad (4.3)$$

である。そこで、8極磁石も含めた一周写像は  $(X, P) \rightarrow (X'', P'')$ 、

$$\begin{pmatrix} X' \\ P' \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X \\ P \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} X'' \\ P'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X' \\ P' - c(X')^3 \end{pmatrix}$$

となる。

この系は積分不能である。じっさい、ポアンカレプロットをしてみると図2のようにになっている。カオスの存在はこの系が積分不能であることを示している。

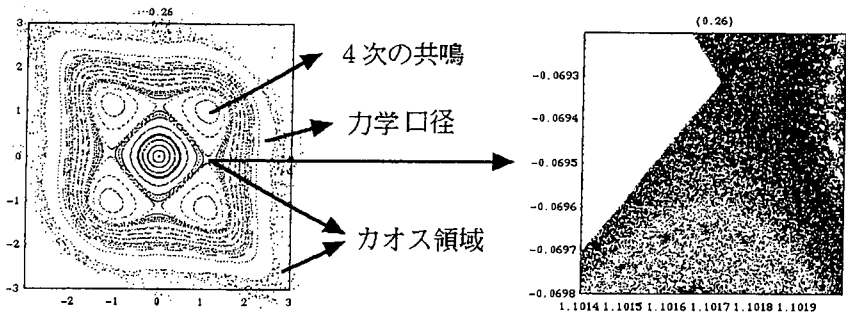


図2: 非線形な挿入をした時のポアンカレプロット。多くの粒子について描いてある。(右)はカオス領域の拡大図。ここでは1粒子についてのプロットが平面的に広がる。 $\mu = 2\pi \times 0.23$ ,  $c = 1$ 。

中心から外に向かって：

1. 正則領域：摂動計算でまかなえる。 $g(X, P)$  のような近似的保存量がある（それが作用変数である）。

2. カオス領域：摂動計算ではまったくどうしようもない領域。一つの粒子の断面が2次元的に広がる。この領域の中で、粒子は乱数的に動き回り、力学系があたかも（疑似）乱数発生器のようにふるまう。明らかに  $g(X, P)$  のような保存量が存在しない。
3. 4次の共鳴：目玉の領域で、その範囲内では正則な運動をする。
4. その外側にまた正則領域がすこしある。
5. 力学口径 (dynamic aperture) : 「この内側の点は常に内側にとどまる」ような領域の境界。
6. 発散領域：力学口径の外側には、 $(X, P) \rightarrow \infty$  となる領域がある。

ここで出てきた「力学口径」はビーム力学のキーワードの一つで、「その内側の点は常に内側にとどまる」という領域の外縁のことだが、そういう領域が有限の大きさで存在するという証明、また存在するための必要条件は知られていない。(自由度1の time-dependent 系の場合には、「力学口径」は一番外側の「KAM 曲線」のことであり、その存在も証明されている。) 実際には、ビームが加速器を回っている時間(数時間から一日)のあいだ、内側にとどまっていれば良いので、 $\infty$ の時間に関する力学口径を問題にしなくても良い。このような実効的な力学口径を予測するには、シミュレーションによって、長時間、粒子を追跡すればよい。というか、他には方法がない。

磁石に製作誤差が無くとも、力学口径は有限な値をとる。製作誤差を計算に入れると、一般に力学口径は小さくなる。十分な力学口径が無いとリングへの入射が不可能になる(入射してもすぐにロスする)。入射できたとしても、ビームの寿命が短くなって(中心附近の粒子も、様々な要因で大きな振幅を持つ確率があり、その時その粒子は失われる)、ビームとしては役に立たない。有限の手続きで、その存在自体を含めて、3次元の力学系の力学口径を求めるアルゴリズムはありそうも無い。しかし、粒子の長時間安定性は例えば磁石の製作精度に対する要求に直接関係しており、「加速器物理の根本問題」の一つである。力学口径に関するどんな情報も、確実なものであ

れば第一級の業績となるであろう。(いいかげんな「理論」で人を惑わす奴は永久追放に値する)。

## 4.4 CDR の政治的性格

SSC では大量の超伝導磁石を製作しなければならず、個々の磁石の製作誤差を個別に測定するのは費用がかかりすぎるので、全体としての統計的誤差だけを押さえる方針であった。このため、想定できる誤差のパターンをいくつも計算器上で作り(乱数を発生させ、それによって擬似的な誤差のパターンを作る)、長時間シミュレーションによって、最悪の場合の力学口径を決めることが CDG における最も重要な作業であった。ある程度の製作誤差は、補正用磁石を設置することによって解決できるが、その補正用磁石の誤差をも取り入れ、大規模なシミュレーションが行われた。その結果、入射エネルギー 1 TeV、磁石の内径 4 cm というデザインが決定されたのである。

SSC におけるシミュレーションを見ると、しかし、十分な検討がなされたとは言い難い面がある。シミュレーションはさかに行われたが、その内実とはいうと、CDG の段階では既存のプログラムを各種とり集め、(それぞれにポストクを一人ずつ担当させ) それらの中で一番悲観的な結果を採る<sup>\*3</sup>、というかなり安直な方法がとられた。限られた時間内で妥当なデザインを完成しなければならなかったからであろう。SSC のような大型計画であれば、当然、シミュレーションプログラムを新たに作成するはずである。プログラムにどういう物理的効果がどのように取り入れられているか、完全に把握できていなければ、計算結果を信用することはできないからである<sup>\*4</sup>。このよ

---

<sup>\*3</sup> ほんとうにそうしたのかどうかさえ、実ははっきりしない。いい結果がでるまで乱数を取り替えた、という人もいる。

<sup>\*4</sup> 「自分たちで作ったコードを使って失敗すると責任問題となるから」という別の、よりうがった見方もある。



うな作業によって1986年の報告書、CDR[7]、が書かれたのである。

しかし、233 ページには「入射エネルギー は主として磁石の精度に対する要求から決まる。磁石の非線形成分の補正システムが簡単化できるには、入射エネルギーを2~3TeV にしなければならないが、この場合、入射システムの費用が禁止的に高くなり、まじめに考えるまでもない」という「苦渋に満ちた」表現が記されている。入射エネルギーを高くすれば、粒子は磁石の製作誤差に鈍感になるので、製作誤差の許容度が上がり、磁石の設計を容易にし、補正システムの費用も下がる。しかし、CDR では、費用の点で入射エネルギーを下げ、その分、磁石システムの誤差にたいする許容度を酷しいものにする（いいかえれば磁石製作に楽天的な）決定をしたものである。これはつまり、磁石とその補正システムに問題点を押しつけ、総費用の見積もりを低く抑えたということである。実は、当時から専門家の間には、磁石の内径4 cm で、制作誤差の許容値におさまるものを大量生産するのは技術的に難しいのではないかと、という思いがあったようだ [12]。専門家のそのような思いは CDR に反映されなかった\*5。当時の SSC の状況では総費用を低く抑えて、政府に計画を認めてもらう必要があったので、そのために楽天的な数値を出したのではないかと疑われる。

CDR が物理学的根拠の無い、全くの「政治文書」であったわけではない。政治的判断と見えるところは、

- 力学口径を推定するシミュレーションはどの程度信頼できるか
- 磁石システムの製作誤差に対する推定はどの程度信頼できるか

---

\*5 SSC の磁石に限らず、ものごとの計画段階では「景気のいい」、「先鋭」な議論が優勢になるのが一般的で、この場合も「1TeV-4cm ではできない」と証明することは不可能であるし、できると言ったほうが、カッコいい、という側面があったのではないかと、という観測がある [10]。SSC の場合にそうだったかどうか分らないとはいえ、これはもの作りに関わったことのある人なら理解できる感覚であろう。第2次大戦前にも、「がんばれば勝てる」と言ったほうが、カッコよかったであろう。

という点に対する立場の違いがもたらすものである。この両者とも学問的には、判断できず、ある程度の経験と直感によって、「独断的」に決めるしか無いものであろう。これを学問的に判断しようと思えば、実際に作ってみるしか無いのである。

磁石システムは試作してみれば、かなり正確なデータが得られる。実際、計画が認められてから後、いくつかの研究所で磁石の試作が行われ、技術上の難しさが指摘された。一方、シミュレーションの信頼性に関しては、既存の加速器に同じシミュレーションを適応して両者を比較することが行われた。両者の一致は良かったと報告されているが、実は現実の加速器で磁石システムの制作誤差が十分に把握されているわけではなく、シミュレーションというものはパラメータのとりかたで、結果はいかようにもなる、という面もあり、CDRの結論が十分な説得力のあるものというわけでは無かった。

SSC デザイングループのリーダーであった A. Chao による報告が ICFA Beam Dynamics Newsletter[13] に毎年出ている。1988年には上記の加速器実験が報告され、CDRの結論を正当なものとしている。にもかかわらず、1989年になると「safety margin と cost のバランス」という気弱な言葉とともに 2TeV-5cm という数字が現れる。1990年には、2TeV-5cm が決定された、と報告している。この年には、2TeV-5cm を支持する新たなシミュレーションの結果が発表されていた [14] が、その結論自体は 89年には知られていたようだ。

1TeV-4cm では何となく危ない、という気分が大勢を占めるなか、この論文が「理論的支柱」となって SSC 計画諮問委員会では 2TeV-5cm を推奨することとなったようだ\*6。しかし、この論文を読んでみると、シミュレーションの方法などに関する記述、CDG の結論への批判などが書かれていず、シミュレーションの結果だけが述べられているにすぎない。専門的に説得力

---

\*6 但し、その文献がほんとうに文献 [14] であったかは確かでないが、発行時期からしてこの文献と思われる。

のある論文とはいえない。誰かが言い出すのを待って、雪崩的にデザインを変更する方向に動いた、というのが真相ではないかと疑われる。

CDGにおけるデザイン研究では、磁石の制作誤差の見積もりについて現実的に妥当な判断というより、政治的な思惑の影響もあって、物理学的に不可能とは言えない、ぎりぎりの仮定を用い、形式的なシミュレーションによって結論を出した様に見える。このデザインの「もっともらしさ」がかなり低いことは、当事者である加速器物理学者にとっては当然、意識されていたであろう。2TeV-5cmへのデザイン変更のきっかけとなった文献[14]に対して、CDG側からの学問的反論があっただけとしかるべきと思えるが、文献には現れていない。このことにも、CDG側の自信のなさが現れている。

## 4.5 シミュレーション倫理

冒頭に述べたように、シミュレーションには

1. ある仮説に基づき既知の現象を再現することによって、仮説を正当化する、
2. 既知の法則や信頼できる仮説に基づいて未知の現象を予測する、

という2つの側面がある。1の例としては、あるプラズマ現象のシミュレーションで、平均場近似を使うと現象が再現できないが、粒子間のクーロン相互作用を入れればできる、すなわち、その現象には粒子の離散性が重要で、平均場的な理論でいくらがんばってもダメということが示せた、というような使い方である。2は、たとえば古典力学に基づいてこれまでのスケールをはるかに越える新しい原子炉を設計するような場合に当たる。このような場合には、シミュレーションになんらかの「理論=仮説」が含まれているのがふつうである。第1原理からすべてを計算するシミュレーションコードとい

うのは、このカテゴリーの場合には無いといってよいだろう（核反応に関わるすべての粒子を追跡することは、現在のコンピュータのメモリ、計算時間の制限から不可能である）。複雑な系では、系の規模が大きくなると新しい物理が重要になることがあり、従来の規模の原子炉では十分に現象を記述したコードでも、新しい大型の炉にも適用できるかどうかは自明ではない。

シミュレーションは常に何らかの近似をとまうので、その近似が本当に正しいかどうかは、装置を建設するまで分からない。また、部品の製作誤差、実際の装置における相互の位置関係の誤差なども、実際に作って見なければよくわからない。シミュレーションでは、あらかじめ知ることができない誤差を乱数を用いて仮に作り、その影響を調べる。この乱数が異なれば予想される装置の性能も異なる。あらゆる乱数について共通に得られる最低の性能がデザインで保証できる性能と見なされる。これらの不確定要素をいかに十分取り入れるかは、どういう誤差がどの程度あるかを含めて、最終的にはシミュレーションをする物理学者の判断による。

シミュレーションの結果を信頼するかどうかは、学問的には決められない。結局は研究者の確信、または「思い込み」であろう。自分で作ったプログラムでも、モデルの設定、方程式の数値解法、近似の妥当性などの判断の上にデバッグを重ね、あるところで、「これを信頼することにする」と決めるのである。もちろん、考えられるあらゆる既知の結果と consistent であることは必要条件であるが、当然、十分条件ではない\*7。プログラムの誤り（バグ）や入力ミスの問題もある。プログラムに内在する諸仮定であれ、バグであれ、パラメタの値によって深刻な誤りになったりそうでなかったりする。このようなことは、自分でプログラムを作りシミュレーションに携わってきた人なら誰でも、知っていることであり、彼らはシミュレーションのみ

---

\*7 他人の作ったプログラムだと、プログラムそのものを見るしか判断の方法は無いが、それは現実的には不可能であり、結局「誰が作ったか」で判断するようなものではないかと思う。

によって重大な結論を出すことには躊躇するだろう\*8。

しかし、大型の装置を設計、建設するには實際上、シミュレーションによるしかない。つまり、研究者の学問的には証明され得ない確信に依存しているのである。

ここに先端的大型装置建設においてアカデミズムが重要となる理由がある。もし、すべてが理解されているのであれば、装置建設もマニュアル化された仕事となり、単に「手抜きをするな」というような、一般職業倫理のみが問題となるであろう。しかし、すべてを把握することはできなくても、できうる限り良く理解する必要がある。また、どこまでは理解され、どこから先は理解されていないか、を常に問題とすることも必要である。この消極的効用としては不注意による失敗が避けられることがある。より積極的な効用は、計画の問題点を未然に回避し、性能向上を可能とすることであろう。また、これまで未解決だった問題を解明し、理解された領域を広げる契機となることもあるだろう。反対に、この局面で、研究者のアカデミズムが試されることにもなる。CDGにおける加速器物理学者のアカデミズムについては不十分だった感がある。しかし、問題の本質は研究者の資質やデザインの手法などにあるのでは無い。

「シミュレーションというものはパラメータのとりかたで、結果はいかようにもなる、という面がある」のは確かだが、逆に、物理学的にまっとうにやれば、結果にそう大きな(定性的な)差は出ない、ということもある。しかし、物理学的にはわずかで定量的な差といえども、予算や計画の進め方という点では大きな違いになる場合、ある種の政治的判断が入り込む余地ができるのであろう。シミュレーションを含め先鋭的装置のデザインにはそのような不定性がある。デザインが正しいかどうかは、結局は作ってみなければ

---

\*8 高速増殖炉「もんじゅ」の事故では、アメリカ機械学会のコードの誤使用が原因とされている [15]。CAD(Computer Aided Design)の(コードが内包する近似や諸仮定の範囲を越えた)盲目的使用に対する危険性は文献 [?] に詳しく論じられている。

ば解らないものであり、装置の建設自体も開発実験の一環であることを研究者も社会も認識すべきであろう。大型装置科学を社会が受け入れるなら、その不定性、経済的リスク、場合によっては安全に関わるリスクまでをも受け入れる覚悟が必要なのではないだろうか。

# 文献

- [1] 平田光司、「SSC とカオス」、総合研究大学院大学グループ研究「新分野の開拓」論文集「新分野'99」(2000)。
- [2] 平田光司、高岩義信、「SSC-巨大実験の科学」、岩波講座「科学／技術と人間」第2巻。
- [3] 平田光司「SSC と大型装置科学の現在」岩波「科学」Vol.69,164 (1999).
- [4] 佐藤文隆、「物理と幸福」、岩波書店。
- [5] 加速器、測定器開発の重要性を考慮した高エネルギー物理学の解説に、レーダーマン・シュラム (平田光司、清水韶光訳)『クォークから宇宙へ』(東京化学同人、1993年)がある。
- [6] 平田光司 「大型装置純粋科学試論」、年報「科学・技術・社会」vol.8、p.51 (1999)。
- [7] SSC Central Design Group, *Conceptual Design of the Superconducting Super Collider*, SSC-SR-2020, March 1986.
- [8] *Site-Specific Conceptual Design*, SSCL-SR-1056, 1990.
- [9] "*Site-Specific Conceptual Design of the Superconducting Super Collider Executive Summary*", SSCL-SR-1055, 1990.
- [10] 土屋清澄、private communication.
- [11] 簡単な解説は、平田光司「加速器における古典力学」、数理科学33巻 p.54(1995)にある。
- [12] 和氣正芳、private communication.

- [13] ICFA Beam Dynamics Newsletter No.3(1988) から No.5(1990) の各号。当時はほぼ毎年1回発行されていた。現在は年3回。
- [14] T.Garavaglia, S.Kauffmann, R. Stiening, and D.Ritson, *Numerical Studies of the SSC Injection Process: Long Term Tracking*, SSCL-268 (1990).
- [15] 高木仁三郎、「原発事故はなぜくりかえすのか」、岩波新書(2000)。bibitemferguson E.S. ファーガソン、「技術屋の心眼」、藤原良樹、砂田久吉(訳)、平凡社(1995)。
- [16] この線にそった高エネルギー物理学関係者への提言が以下にある：平田光司「ビームの物理」KEK ニュース1999年2月(高エネルギー加速器研究機構)。これは以下の URL でも見ることができる。

<http://koryu.soken.ac.jp/home/staff/teacher/hirata/beamphys.html>