

## 7.6 SSCとカオス

平田光司

hirata@soken.ac.jp

教育研究交流センター

メインリングにおける入射エネルギーの倍増と磁石の直径の増大がSSCの総予算を大きく押し上げ、SSC中止の遠因となった。この大きな設計変更が何故必要だったか、それは妥当であったか、について議論する<sup>1</sup>。

### 7.6.1 はじめに

超伝導超大型衝突型加速器 (SSC)[1]は様々な論点から分析するにふさわしい問題として「大型装置科学の科学論」の中心的話題となっている。始めから「科学と社会」という大きな(大きすぎる)枠組みでものごとを考えると、細かい、微妙な点が見過ごされてしまい、個々の歴史的現象が何らかの理論の実例に矮小化されてしまう気がする。逆にある現象を徹底的に調べることによって、理論先行の発想では見落とされている重要な論点を見いだす可能性がある。SSCのケーススタディーを延々と続けるのは、このためである(と個人的には思っている)。

このような見過ごされやすい問題の一つとして、SSCにおける研究開発体制がある[2]。従来のように物理学者が計画を遂行する責任主体とならず、官僚主導型の体制を採用したために、物理学者の自発的な問題発見および解決能力を抑圧する結果となった。これは今日、日本における(原子力、宇宙開発などもふくめた)大型科学計画においても起こり得る(起っている?)問題として、真剣な検討を要する問題点と考える。

本論では、似たような見過ごされやすい問題として、SSCの設計段階において現れたアカデミックな問題について指摘し、議論したい<sup>2</sup>。

### 7.6.2 SSC加速器

SSCは周長約87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、20TeV(テラ電子ボルト)の2つの陽子ビームを作り、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、途中に何段階か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1TeV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20TeV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[4]。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53億ドルとされた。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)[5, ?]。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1TeVから2TeVにあげ、
- 加速器の内径(口径)を4cmから5cmにあげた

<sup>1</sup>1998年7月に開かれた小グループ「大型装置科学の科学論研究会」での発表にもとづく。

<sup>2</sup>この話題については文献[3]でもふれたが、専門的議論はしていない。

ことである。このため、SSCの総予算は当初の53億ドルから83億ドルへと大きく上昇した。

入射エネルギーを1TeVから2TeV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<sup>3</sup>

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多くなり1993年の中止決定にいたる。

### 7.6.3 加速器の力学開口

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

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B},$$

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 $X$ であらわそう。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normalize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の曲線に乗っている。つまり、切断面において $X$ 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、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

$$\begin{pmatrix} X' \\ P' \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X \\ P \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} \cos \mu & \sin \mu \\ -\sin \mu & \cos \mu \end{pmatrix}, \quad (1)$$

であり、 $n$ 周めの座標は

$$\begin{pmatrix} X' \\ P' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos n\mu & \sin n\mu \\ -\sin n\mu & \cos n\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ P \end{pmatrix}, \quad (2)$$

<sup>3</sup>実は、それ以外に「どさくさにまぎれて」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)をより現実的なものにした[7]。

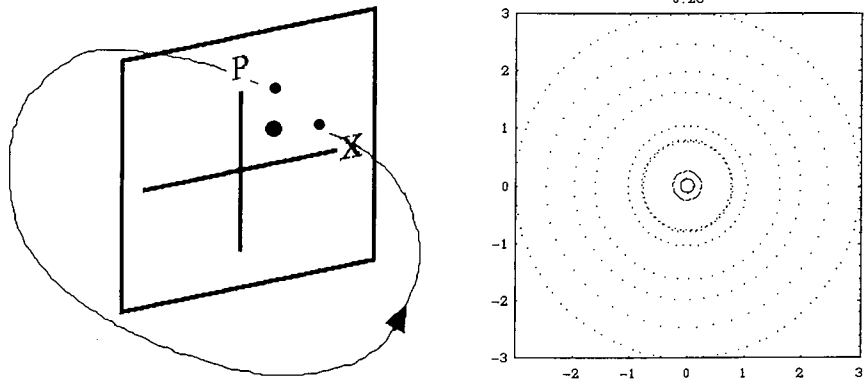


図1: (左) ポアンカレプロット: ある $(X, P)$ から出発した粒子を、それが観測点 $O$ に来るたびに相平面上にプロットして得られる図。(右) 振幅が十分小さい時のポアンカレプロット。いくつかの、別々の初期値に対して描かれたものをまとめている。

と「解析的」に与えられる。

しかし、良く知られているように、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として、もともとのリングでは運動が(1)式で表されるが、一箇所に新たな非線形力が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

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

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。

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action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。

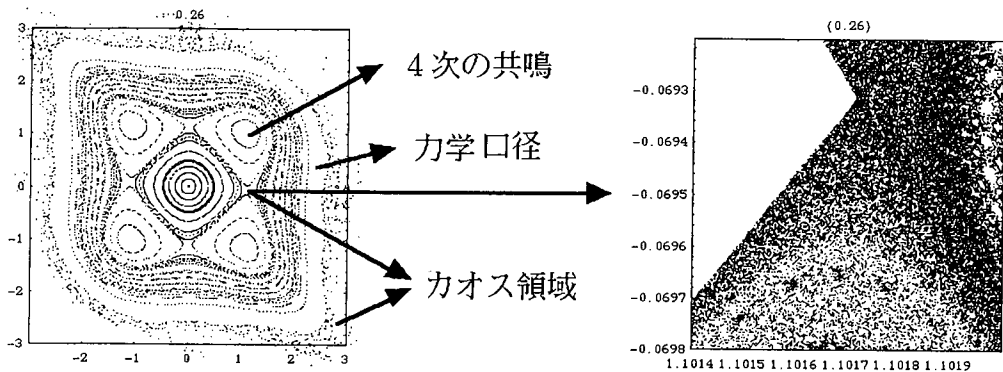


図 2: 非線形な挿入をした時のポアンカレプロット。多くの粒子について描いてある。(右)はカオス領域の拡大図。ここでは1粒子についてのプロットが平面的に拡がる。 $\mu = 2\pi \times 0.23, c = 1$ 。

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。この様なeffective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)。

#### 7.6.4 入射エネルギーと磁石の直径

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シミュレーションに取り入れ、大規模なシミュレーションが行われた。この結果、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。しかし、CDR[4]の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2~3 TeV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。当時のSSCの状況では総費用を低く抑さえ、政府に計画を認めてもらふ必要があったので、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。

ここに2つの物理的／技術的な問題が見える。

- 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
- 磁石システム製作のむずかしさに対する推定はどの程度信頼できるか

この両者ともはっきりしたことは解らず、ある程度の経験と直感によって、「独断的」にきめるしか無いものであろう。しかし、その決定によって費用が大きく左右される。実は、当時から専門家の間には、磁石の内径4cm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[8]。専門家のそのような思いはCDRに反映されなかった<sup>4</sup>。

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、実は現実の加速器の磁石システムの制作精度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[9]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[10]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<sup>5</sup>。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。

### 7.6.5 大型装置科学における意志決定

SSCのデザインで起きたことを見ると、加速器の理論とは何か、という疑問がわくであろう。計画を全体としてリードする、というよりも、時代の流れに合わせた理論的結果を「ひねりだし」て理

<sup>4</sup>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」「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[7]。SSCの場合にそうだったかどうか分からないとはいえ、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、カッコよかったのであろう。

<sup>5</sup>但し、その文献がほんとうに文献[10]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。

論的支柱を与えるという、どこかの国の知識人のようなものではないか？

先鋭的な装置の計画、設計にあたっては、知られている限りの方法によって十分なチェックを行うことは当然であるが、装置が先鋭であればあるほどこれは難しくなる。このチェックの方法自体も不確定さを含むものである。SSCの場合には加速粒子のシミュレーションはさかに行われたが、その内実はというと、CDGの段階では既存のプログラムを各種とり集め、(それぞれにポストド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>6</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のデザイン研究のありかたには批判されるべき点はあるが、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<sup>7</sup>。しかし、そのわずかな定量的な差によって、予算や計画の進め方が大きく左右される場合、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。先鋭的装置の場合、デザインが正しいかどうかは、結局は作ってみなければ解らないものであり、加速器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、その不定性までも受け入れる覚悟が必要なのではないだろうか。それでも社会は大型装置科学を受け入れるだろうか？

先鋭的加速器は常に金食い虫と呼ばれて来たが、規模と予算を拡大してきた。そういう時代は終わった、または終わりつつある。一方、今後の高エネルギー加速器はますます先鋭的なものにならざるを得ない[3]。そのための負担を社会に求めるには、在来手法に少し先端的な部分を付け加え、結局は規模を大きくすることで性能をあげるという「安易な」SSC的な計画のありかたは、考えなおさなければならないであろう[11]。

#### 文献

- [1] 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。
- [2] 平田光司「SSCと大型装置科学の現在」岩波「科学」Vol.69,164(1999)。
- [3] 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)。
- [4] SSC Central Design Group, *Conceptual Design of the Superconducting Super Collider*, SSC-SR-2020, March 1986.
- [5] *Site-Specific Conceptual Design*, SSCL-SR-1056, 1990.
- [6] “*Site-Specific Conceptual Design of the Superconducting Super Collider Executive Summary*”, SSCL-SR-1055, 1990.
- [7] 土屋清澄、private communication.

<sup>6</sup>ほんとうにそうしたかどうか、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>7</sup>シミュレーションの結果を信頼するかどうかは、結局は研究者の思い込みであろう。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。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。

- [8] 和気正芳、private communication.
- [9] 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。
- [10] T.Garavaglia, S.Kauffmann, R. Stiening, and D.Ritson, *Numerical Studies of the SSC Injection Process: Long Term Tracking*, SSCL-268 (1990).
- [11] 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>