

位相空間上の力学系

慶大 工 齋藤利弥

1. ふつう採用されている力学系 (抽象力学系) の定義は次のようなものである.

X を位相空間, \mathbb{R} を実数全体の集合, π を $X \times \mathbb{R}$ から X への写像で次の性質を満たすものとする.

- a) π は連続な写像である.
- b) $\pi(x, 0) = x$.
- c) $x \in X, t, s \in \mathbb{R}, \pi(x, t) = y$ のとき
$$\pi(y, s) = \pi(x, t+s).$$

このとき X を相空間とする力学系 が与えられたといひ, それを (X, \mathbb{R}, π) で表す. これは, よく知られているように, Poincaré が提唱した, 微分方程式の定性的理論を抽象的にとりあつかうためにつくられた概念である.

2. この定義を微分方程式論の立場から少し検討してみよう.

X を \mathbb{R}^n の開集合, $f(x)$ ($x \in X$) を X から \mathbb{R}^n への連続な写像とし, 微分方程式

$$(1) \quad \frac{dx}{dt} = f(x)$$

を X 上で考える. Peano の存在定理により, (1) の初期値問題の解はつねに存在する. さらに $f(x)$ に適当な素直さ (たとえば Lipschitzian) を仮定すると, その解は一意性をもつ. としてその解は, 延長とよばれる手続きによって, その定義域をひろげることができる.

$t = 0$ で $x \in X$ を通る (1) の延長不能解 (すなわち解が延長できる限りその定義域をひろげてしまったもの) を考え, これを $\pi(x, t)$ と書くと, これは次の性質をもつことが知られている.

1) x をとめたとき, $\pi(x, t)$ は \mathbb{R} の開区間 $I_x = (\alpha_x, \omega_x)$ で定義される. ただし $-\infty \leq \alpha_x < 0 < \omega_x \leq \infty$ で, $t \rightarrow \omega_x$ および $t \rightarrow \alpha_x$ のとき, 点 $(\pi(x, t), t)$ は $X \times \mathbb{R}$ の境界に限りなく近づく. したがってもし, $\omega_x < \infty$ ($\alpha_x > -\infty$) ならば $t \rightarrow \omega_x$ ($t \rightarrow \alpha_x$) のとき $\pi(x, t)$ は X の境界に限りなく近づく.

2) $\pi(x, t)$ は (x, t) に関して連続である.

3) $\pi(x, 0) = x$.

4

4) $t \in I_x, y = \pi(x, t), \Delta \in I_y, t + \Delta \in I_x$ ならば
 $\pi(y, \Delta) = \pi(x, t + \Delta)$.

ここで、1) は延長不能解の存在に関する定理、2) は初期値に関する連続性、3) は初期条件そのもの、4) は解の一貫性と、(1)の右辺が t を含まないこと（すなわち、(1)が autonomous system であること）からの帰結である。

もちろん $\pi(x, t)$ はこの他にもいろいろ性質をもっている。たとえば $\pi(x, t)$ は t について（連続であるのみならず）微分可能でもある。しかし定性的理論ということばをもっとも弱く解釈して $\pi(x, t)$ で表される X の中の曲線 — すなわち軌道の topological behaviour をしらべるという意味にとらえれば、上記の 1) ~ 4) がもっとも基本的な性質であると考えるてもよいであろう。いいかえれば、微分方程式論の基本定理から直接導かれるこれら4つの性質だけから、 $\pi(x, t)$ の性質についてどれだけのことがいえるかをつきとめておくことは微分方程式の定性的理論の出発点としては、まず妥当だと思われる。

ところで X を \mathbb{R}^n の中の開集合と考えることは、微分方程式論の枠の中で考えても強すぎる制限である。たとえば (1) が積分をもっているとき、それを利用して方程式の数を減らすことは、微分方程式を解くときの常套手段である。その結果

得られる方程式はやはり (1) のような形をしているが, $f(x)$ の定義域は積分曲面 — あるいは多様体 — である. そこでこの制限を思い切ってゆるめてしまおう.

さらに微分方程式の解の性質のうち 1) ~ 4) から導かれるもの以外はすべて捨象してしまうのだから, むしろ, 性質 1) ~ 4) によって定義されるものをわれわれの研究の対象としてとりあげるほうが自然であろう.

3. 以上のことを考えて, 次のような定義をつくってみる.

X を位相空間とし, $X \times \mathbb{R}$ の開集合 D と, D から X への写像 π で, 次の性質を満たすものが与えられているとする.

I) D は $\bigcup_{x \in X} \{x\} \times I_x$ のような形をもつ. ただし I_x は \mathbb{R} の開区間 (α_x, ω_x) で $-\infty \leq \alpha_x < 0 < \omega_x \leq \infty$.

II) π は連続である.

III) $\pi(x, 0) = x$.

IV) $t \in I_x$, $\pi(x, t) = y$, $s \in I_y$, $t+s \in I_x$ ならば
 $\pi(y, s) = \pi(x, t+s)$.

V) $\omega_x < \infty$ ならば $L^+(x) = \phi$. $\alpha_x > -\infty$ ならば $L^-(x) = \phi$. したがって $L^+(x)$ ($L^-(x)$) は $t \rightarrow \omega_x$ ($t \rightarrow \alpha_x$) のときの $\pi(x, t)$ の cluster set である. すなわち

$$L^+(x) = \bigcap_{\tau \in I_x} \overline{\bigcup_{t \geq \tau} \{\pi(x, t)\}}, \quad L^-(x) = \bigcap_{\tau \in I_x} \overline{\bigcup_{t \leq \tau} \{\pi(x, t)\}}.$$

このとき pair (D, π) を X を相空間とする局所力学系 (local dynamical system) とよぶ。1) ~ 4) と上記の I) ~ V) とが次のように対応していることは明らかである。
 1) \rightarrow I) + V), 2) \rightarrow II), 3) \rightarrow III), 4) \rightarrow IV)

4. 局所力学系の定義において, さらに

$$(2) \quad I_x = \mathbb{R} \quad \text{for } \forall x \in X$$

という条件をつけ加えると, 最初に述べた力学系の定義が得られる。

微分方程式 (1) が条件 (2) を満足しているとき, (1) は global existence property をもつという。したがって, 最初に述べた力学系の定義は global existence property をもつ微分方程式をとりあつかうには適切な抽象化である。その意味でこれを 大域力学系 (global dynamical system) とよぶ。

X が compact な位相空間であるならば, (1) は確かに global existence property をもつ。しかし一般にはこれはきわめて強い条件である。たとえば力学系の理論の源ともいえるべき天体力学において, 天体間の衝突がふくむ場合にはこの性質がなりたたない。したがって衝突を含んだ多体問題を大域力学系の framework の中で処理することはできない。

も、ともこの点については1つの逃げ道が用意されている。それは適当な reparametrization (time change) を行うことにより(1)はつねに global existence property をもつ方程式に変換できる — という Vinograd の定理 である。

これが多くの場合に有効な逃げ道になっていることは間違ないが、果してすべての場合がこの定理で救われるのだろうか。もしそうならば、 X がもっと大きい空間にうめこまれている場合、その境界点の近傍における軌道の行動と、特異点（あるいは不動点）の近傍における軌道の行動との間には、本質的な相違はないことになる。これは本当だろうか。

5. 局所力学系に関して、いくつかの注意をつけ加えておく。大域力学系は、それを不変集合の上に制限すればやはり大域力学系になるけれども、任意の集合の上に制限したのでは、もちろん大域力学系にならない。しかし任意の開集合の上に制限すれば局所力学系になる。このために、局所力学系の研究は、大域力学系の軌道の局所的研究にとって強力な道具となる。

もう1つの注意は、微分方程式論とのより精密な対応についてである。1) ~ 4) は微分方程式の延長不能解の性質を抽象したものである。ところが延長不能解というのは、local

な解に延長 (extension) という操作を可能な限り施して得られるものである。

さて、局所力学系の定義において、I) をすこし変え、V) をとり去る。これだけの条件で定義されるものを germ とよぶことにすると、これはまさに微分方程式の local な解を抽象化したものとみなされる。そして1つの germ からただ1つの局所力学系が生成されることを証明できる。このことは local な解から延長不能解をつくる手続が、微分方程式よりもはるかに一般的な局所力学系においても可能であることを示している。

このことは重要であると思われる。というのは局所力学系は相空間としてきわめて一般的な位相空間をと、ているので、微分方程式以外の関数方程式ともその枠の中に組み込み得る可能性をもっている。その場合 local な存在および一意性の定理がなりたって germ が形成されれば、上の事実から延長不能解の存在が保証され、局所力学系としてのとりあつかいが可能なことがわかることになる。

6. 一般に力学系といえば大域力学系のことである。これは局所力学系という概念がきわめて狭く、しかもとりあつかいははるかに難しいため、研究成果に見るべきものが少い

からである。これに比べて大域力学系は、その概念が今世紀のはじめにつくられて以来、今日までに極めて豊富な成果をあげている。そこで以下では大域力学系に話を限り、これをたんに力学系とよぶことにする。

性質 a), b), c) を基にして力学系の性質を体系的に研究した最初の人 $G. D. Birkhoff$ である。彼はその基本的な部分をほとんど独力でやりとげてしまった。そこで $Birkhoff$ の仕事を中心にして、力学系の一般的な研究方針をまとめてみよう。この際利用できる主要な武器は $general\ topology$ である。それ以外に、場合によってはいくらかの代数的手法（たとえば位相群の理論）が援用できる。それは力学系の定義の中に代数的構造 c) が含まれているためである。

$x \in X$ に対して

$$C(x) = \bigcup_{t \in \mathbb{R}} \{\pi(x, t)\},$$

$$L^+(x) = \bigcap_{\tau \in \mathbb{R}} \overline{\bigcup_{t \geq \tau} \{\pi(x, t)\}}, \quad L^-(x) = \bigcap_{\tau \in \mathbb{R}} \overline{\bigcup_{t \leq \tau} \{\pi(x, t)\}}$$

とおく。 $C(x)$ は軌道, $L^+(x)$, $L^-(x)$ はそれぞれ ω 極限集合, α 極限集合とよばれる。

$C(x)$ を, それと $L^\pm(x)$ との関係にしたがって次のように分類する。

- i) $L^+(x) = \emptyset$: positively receding
- ii) $L^-(x) = \emptyset$: negatively receding

- iii) $L^+(x) \neq \emptyset, C(x) \cap L^+(x) = \emptyset$: positively asymptotic
- iv) $L^-(x) \neq \emptyset, C(x) \cap L^-(x) = \emptyset$: negatively asymptotic
- v) $L^+(x) \neq \emptyset, C(x) \cap L^+(x) \neq \emptyset$: positively Poisson stable
- vi) $L^-(x) \neq \emptyset, C(x) \cap L^-(x) \neq \emptyset$: negatively Poisson stable
- vii) v) \vee vi): Poisson stable

簡単のため今後は X は compact とする。このときはつねに $L^\pm(x) \neq \emptyset$ だから receding orbit は存在しない。また $L^\pm(x)$ は compact な不変集合である。

大ざっぱにいうと asymptotic な軌道は $t \rightarrow \infty$ ($t \rightarrow -\infty$) のとき $L^+(x)$ ($L^-(x)$) に吸い込まれてしまうので、その漸近的行動は $L^+(x)$ ($L^-(x)$) の近傍の研究、いわゆる local theory で処理できる。これに反して Poisson stable な軌道は $t \rightarrow \infty$ ($t \rightarrow -\infty$) のとき、軌道上の任意の点のいくらでも近いう所にもとどてくるので、その研究には本質的に global な考察が必要である。特異点と周期軌道とは例外的に簡単な Poisson stable orbit であるが、それ以外のものは一般に複雑な行動をとる。

そこで問題を整理して、理論を local part と global part とに分けることを考えてみよう。

$x \in X$ とする。 x の近傍 U を適当に小さく、 $\tau > 0$ を適当に小さくとると、 $t > \tau$ ならば $\pi(U, t) \cap U = \emptyset$ となると

き x は wandering point であるという。(このとき実は $|t| > \tau$ ならば $\pi(U, t) \cap U = \emptyset$ となる.)

X の中の wandering point 全体の集合を W_1 とする. W_1 は \mathbb{R} -不変集合である. $X - W_1 = X_1$ とおくと X_1 は τ 近傍 (したがってコンパクト) 不変集合になる. はじめの力学系の X_1 の上への restriction を (X_1, \mathbb{R}, π) とする.

(X_1, \mathbb{R}, π) の wandering point の全体を W_2 とし, $X_1 - W_2 = X_2$ とする.

(X_2, \mathbb{R}, π) の wandering point の全体を W_3 とし, $X_2 - W_3 = X_3$ とする.

この手順をくりかえしていくと, ある順序数 α が存在して $(X_\alpha, \mathbb{R}, \pi)$ は wandering point をもたない力学系になる. すなわちこの手順は, ここで終る.

X_α は (X, \mathbb{R}, π) の Poisson stable な軌道全体の集合の closure と一致する.

上記のことは Birkhoff により証明された. 彼は X_α を set of central motions とよんだ.

7. x がある軌道 $C(y)$ の極限集合 $L^\pm(y)$ に属しているならば, それは wandering point ではない. したがって $x \in W_k$ ならば $L^\pm(x) \subset X_k$. すなわち, $X_{k-1} = W_k \cup X_k$ という分

解により, 力学系 $(X_{k-1}, \mathbb{R}, \pi)$ は (W_k, \mathbb{R}, π) と (X_k, \mathbb{R}, π) とに分解され

1) (W_k, \mathbb{R}, π) においては, すべての点が wandering point であり, したがってすべての軌道は (正にも負にも) receding である.

2) $|t|$ が十分大きいと, $\pi(x, t)$ ($x \in W_k$) は X_k の近傍にはいりこんでしまう.

1) のような性質をもつ力学系を, 完全に不安定な力学系 (completely unstable system) とよぶ. すなわち, 力学系 $(X_{k-1}, \mathbb{R}, \pi)$ の研究は

A) 完全に不安定な力学系の構造をしらべること,

B) コンパクトな不変集合 X_k の近傍での軌道の行動をしらべること,

の 2 つの部分に分離される.

ところが $(X_\alpha, \mathbb{R}, \pi)$ はもはや wandering point をもたないから, このような分離は不可能で, われわれは研究の最終段階として

C) wandering point を 1 つももたない力学系の構造をしらべること,

とこの問題を解かねばならない. このように考えれば, 一般に力学系の研究は global part A), C) と local part B) と

に分けられ、その中間に、コンパクトな不変集合の列

$$X \supset X_1 \supset X_2 \supset \dots \supset X_\alpha$$

を見いだすという問題が存在する。この問題を D) と名づけよう。

これら 4 つの問題のうちでいちばん難しいのはおそらく C) であり、B) と D) がこれに次ぐのではないかと思われる。

力学系の保測性をもつ場合には Poincaré の帰帰定理により $X = X_\alpha$ となるので、いちばん難しい問題 C) にははじめから直面しなくてはならない。

Poincaré と Bendixson が研究した S^2 上の力学系では、 X_α は特異点と周期軌道とをあわせたものになる。したがって、 $(X_\alpha, \mathbb{R}, \pi)$ の構造はもはやしらべる必要がなく、問題 C) は存在しない。さらにこの場合には、 (W_k, \mathbb{R}, π) はすべて平行化可能な力学系 (parallelizable system) とよばれる簡単な構造をもつことが証明される。それゆえ問題は A) と D) とにいはられる。ところが local part A) は上記 2 人によって殆ど完全に解決されている。したがって D) だけがこの理論に残されている唯一の難しい問題となる。

8. はじめに述べた局所力学系、およびその germ という概念は浦によるものである。これに関しては次のような文献が

ある。

浦 太郎, 特性曲線の延長と安定の問題, 数学 9(1958),
137~148, 218~235

T. Ura, Sur le courant extérieur à une région in-
variante; Prolongement d'une caractéristique et
l'ordre de stabilité, Funkcial. Ekvac. 2(1959),
105~143

T. Ura, Isomorphisms and local characterization of
local dynamical systems, Funkcial. Ekvac. 12
(1969), 99~122

O. Hájek, Structure of dynamical systems, Comment. Math.
Univ. Carolinae Pragensis, 6(1965), 53~72

G. R. Sell, Non-autonomous differential equations and
topological dynamics I, Trans. Amer. Math. Soc.
127(1967), 241~262

S. Ahmad, On Ura's axioms and local dynamical systems,
Funkcial. Ekvac. 12(1969), 181~191

Birkhoff の理論は, もはや古典的な結果といへばもつ
てあって, いろいろの書物にまとめられている。たとえば次
の書物を参照されたい。

V. V. Nemytskii & V. V. Stepanov, Qualitative theory of

differential equations (Part II), Princeton (1960)

V. V. Nemytskii, Topological problems of the theory of dynamical systems, A. M. S. Translations, 103 (1954), 85 ~ 168

齊藤 利洋, 位相力学 共立出版(1971)

最後に問題を A), B), C), D) の 4 つに整理したが, このうち A) に関しては Nemytskii の重要な結果がある。これは上にあげた Nemytskii - Stepanov の書物に述べられている。

B) については不変集合の安定性を中心として, いろいろの結果が得られており, その多くは

N. P. Bhatia & G. P. Szegö, Stability theory of dynamical systems, Springer (1970)

に集められており, また, これにもれている新しい結果の一部は, 上掲の齊藤の書物に述べられている。

C) については筆者はあまりよくしることを知らない。上掲の Nemytskii - Stepanov の書物や, 齊藤の書物には 1940 年代頃までに得られた結果が述べられている。それ以後の新しい結果については, 論文を調べる以外に方法がないのではあるかと思う。この問題に詳しい方の教示が得られれば幸である。

D) に関する結果は、あまり得られていないようである。
しかしこの問題は local と global とをうまく重要な意味を
もっているように筆者には思われる。筆者はかつてこの方向
を目指していくつかの論文を書いたが、その結果は上掲の
青藤の書物に集められている。