

滑らかな常微分方程式の計算量

太田浩行*

河村彰星†

マルチン・ツィーグラ―‡

カルステン・レースニク§

概要

常微分方程式 $h(0) = 0, h'(t) = g(t, h(t))$ の解 h の計算量と、関数 g の計算量及び制限の関係は、この方程式を数值的に解くことの本質的な難しさを表しているとして調べられている。河村は 2010 年、 g を Lipschitz 条件を満たす多項式時間計算可能な関数に限っても解 h が PSPACE 困難になりうることを示した。本稿ではさらに g を滑らかな関数へ制限した場合を考え、次の結果を得た。1 回連続微分可能な g に限っても解 h はやはり PSPACE 困難でありうる。また任意の k について、 k 回連続微分可能な g に限っても解 h は計数階層 CH について困難でありうる。

1 序論

連続実関数 $g: [0, 1] \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ に対して次の常微分方程式を考える。

$$h(0) = 0, \quad Dh(t) = g(t, h(t)) \quad (t \in [0, 1]) \quad (1.1)$$

ただし Dh は h の導関数。本稿では g が多項式時間計算可能であるとき、解 h がどれほど複雑でありうるかを考える。ここで多項式時間を初めとする計算量は計算可能解析学 (Computable Analysis) [14] における概念であり、実関数を指定された精度で近似する計算の困難さを測るものである (本稿では 2 節で説明する)。

g に多項式時間計算可能であることの他に何の制限も設けない場合、解 h (一般に一意でない) は計算不能でありうるため、様々な制限の下で h の計算量が研究されている (表 1.1)。この表では下に向うにつれて左列の条件が強まっており、 g が (大域的) Lipschitz 条件を満たせば解 h が一意であるが、表の第 3 行にある通りこのとき唯一解 h はちょうど PSPACE 困難でありうることがわっている [3]。本稿ではより強く g に滑らかさの仮定を置いたときの h の複雑さを調べる。

一般に数値計算においてはしばしば、或る種の算法を適用できるようにするため、或いは解析しやすくするために、与えられる関数に何らかの滑らかさ (十分な回数微分可能であるなど) を仮定

* 東京大学, hota@is.s.u-tokyo.ac.jp

† 東京大学

‡ Martin Ziegler, ダルムシュタット工科大学

§ Carsten Rösnick, ダルムシュタット工科大学

表 1.1 g が多項式時間計算可能であるときの常微分方程式 (1.1) の解 h の計算量

制限	上界	下界
—	—	計算不可能になりうる [11]
h が g の唯一解	計算可能 [1]	任意の時間がかかりうる [6, 9]
g が Lipschitz 条件を満たす	多項式領域計算可能 [6]	PSPACE 困難になりうる [3]
g が $(\infty, 1)$ 回連続微分可能	多項式領域計算可能	PSPACE 困難になりうる (定理 1.1)
g が (∞, k) 回連続微分可能 (k は任意の定数)	多項式領域計算可能	CH 困難になりうる (定理 1.2)
g が解析的	多項式時間計算可能 [10, 8, 2]	—

すると都合のよいことがある。しかしこれは経験則にすぎず、実際に滑らかさの仮定が解の複雑さを計算量の意味で抑える効果をもつのかについてはあまり論ぜられて来なかった。

本稿で扱う微分方程式についていえば、極端なのは g が解析的である場合であり、このときにはテイラー級数による解法により、表の最下列にあるように h は g と同じく多項式時間計算可能になる。本稿では Lipschitz 条件より強いが解析的よりは弱い滑らかさの仮定を考える (表の第 4, 5 行)。ここで (i, j) 回連続微分可能とは、第一、第二変数についてそれぞれ i 回、 j 回微分でき、その導関数が連続であることである^{*1}。

定理 1.1. 多項式時間計算可能かつ $(\infty, 1)$ 回連続微分可能な実関数 $g: [0, 1] \times [-1, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ であって、方程式 (1.1) が PSPACE 困難な解 $h: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ を持つものが存在する。

定理 1.2. 任意の自然数 k に対して、多項式時間計算可能かつ (∞, k) 回連続微分可能な実関数 $g: [0, 1] \times [-1, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ であって、方程式 (1.1) が CH 困難な解 $h: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ を持つものが存在する。但し $\text{CH} \subseteq \text{PSPACE}$ は計数階層 (3.2 節) である。

ここで $g: [0, 1] \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ でなく $g: [0, 1] \times [-1, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ と書いたのは、本稿では実関数の多項式時間計算可能性を、定義域が有界閉領域のときにのみ定義するからである。このため h が区間 $[-1, 1]$ の外に値を取ることがあると方程式 (1.1) が意味をなさなくなるが、定理 1.1 において h が解であるというのは、任意の $t \in [0, 1]$ について $h(t) \in [-1, 1]$ が満たされることも含めて述べている。なお両定理とも Lipschitz 条件よりも強い仮定を置いているため、そのような h は g に対して、存在すれば唯一である。

^{*1} 二変数関数 g が $i + j \leq k$ を満たす任意の自然数 i, j について (i, j) 回連続微分可能であることを k 回連続微分可能と言うこともあるが、本稿では各変数について微分できる回数をこのように分けて書く。

本稿のように対象を滑らかな関数に制限することによる計算量の変化について、常微分方程式以外の問題では次のような否定的な結果がある。多項式時間計算可能な関数から積分により得られる関数は、もとの関数を無限回微分可能なものに限ってもなお一般の場合と同じく #P 困難である。[7, 定理 5.33]。最大化でも同様に、無限回微分可能な関数に限っても一般の場合と同じく NP 困難である [7, 定理 3.7]*² (なお対象を解析的な関数に限ると、やはり級数を用いた議論により、これらは多項式時間計算可能になる)。一方常微分方程式については、定理 1.2 は各 k についてそれぞれ成立つが、 g が (∞, ∞) 回微分可能であると仮定したときの h の計算量については依然不明である。

記法

自然数の集合を \mathbf{N} , 実数の集合を \mathbf{R} , 有理数の集合を \mathbf{Q} と表す。 A, B を \mathbf{R} の有界閉区間とする。実関数 $f: A \rightarrow \mathbf{R}$ に対して $|f| = \sup_{x \in A} f(x)$ と書く。

連続な一変数関数 $f: A \rightarrow \mathbf{R}$ が i 回連続微分可能であるとは、導関数 $Df, D^2f, \dots, D^i f$ が存在し、すべて連続であることと定義する。連続な二変数関数 $g: A \times B \rightarrow \mathbf{R}$ が (i, j) 回連続微分可能であるとは、導関数 $D_1^n D_2^m g$ が、任意の $0 \leq n \leq i, 0 \leq m \leq j$ を満たす n, m において存在し連続であることと定義する。 g が (i, j) 回連続微分可能であるとき、その導関数 $D_1^i D_2^j g$ を $D^{(i,j)} g$ と表記する。また任意の i について g が (i, j) 回連続微分可能であるとき、 g は (∞, j) 回連続微分可能であると定義する。

2 実関数の計算量

2.1 実関数の計算

実数を文字列から文字列への関数で表す。

定義 2.1. 関数 $\phi: \{0\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ が実数 $x \in \mathbf{R}$ の名であるとは、任意の $n \in \mathbf{N}$ について、 $\phi(0^n) = \lfloor x \cdot 2^n \rfloor$ または $\phi(0^n) = \lceil x \cdot 2^n \rceil$ を満たすこと。

ここで $\lfloor \cdot \rfloor, \lceil \cdot \rceil$ とはそれぞれ整数へ切り捨てた値、及び切り上げた値を二進法で書いた文字列を表す。つまり実数 x の名は、長さ n の文字列 0^n を受け取ると、精度 n 桁の x の近似値を返す。

この名を読み書きする機構として、神託チューリング機械 (以下単に機械という) を使う (図 2.1)。

機械 M に、文字列から文字列への関数 ϕ を神託として与え、文字列 0^n を入力として与えたとき、出力される文字列を $M^\phi(0^n)$ で表す。つまり M^ϕ をやはり文字列から文字列への関数とみる。

定義 2.2. A を \mathbf{R} の有界閉区間とする。機械 M が実関数 $f: A \rightarrow \mathbf{R}$ を計算するとは、任意の実

*² ただし葛 [7, 定理 3.7] の証明において関数 f を

$$f(x) = \begin{cases} u_s & \text{if not } R(s, t) \\ u_s + 2^{-(p(n)+2n+1) \cdot n} \cdot h_1(2^{p(n)+2n+1}(x - y_{s,t})) & \text{if } R(s, t) \end{cases}$$

に修正する必要がある。



図 2.1 実関数 f を計算する機械 M

数 $x \in A$, 任意の x の名 ϕ_x に対して, M^{ϕ_x} が $f(x)$ の名であること.

A が \mathbf{R}^2 の有界閉集合であるときにも, 神託を二つ取る機械を考えて同様に定義する.

ある実関数が計算可能であるとは, その関数を計算する神託機械が存在することである. 同様に, ある実関数が多項式時間計算可能であるとは, その関数を計算する多項式時間神託機械が存在することである.

神託機械 M で f を計算するとき, 求める $f(x)$ の精度 n に対して, x の近似値に必要な精度 m が定まるため, 計算可能な関数は連続である. また n と m の対応関係と有理数における近似値を与えることで, 計算可能実関数や多項式時間計算可能実関数に対して, 神託機械を用いない同値な特徴付けが可能である.

補題 2.3. 実関数 $f: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ が多項式時間計算可能であることは, 多項式時間計算可能な関数 $\phi: (\mathbf{Q} \cap [0, 1]) \times \{0\}^* \rightarrow \mathbf{Q}$ と多項式 $p: \mathbf{N} \rightarrow \mathbf{N}$ とが存在し, 任意の $d \in \mathbf{Q} \cap [0, 1]$, $n \in \mathbf{N}$ について

$$|\phi(d, 0^n) - f(d)| \leq 2^{-n} \quad (2.1)$$

任意の $x, y \in [0, 1]$, $m \in \mathbf{N}$ について

$$|x - y| \leq 2^{-p(m)} \Rightarrow |f(x) - f(y)| \leq 2^{-m} \quad (2.2)$$

が成立つことと同値である. 但し \mathbf{Q} の元は分母と分子を二進法の整数で書いた分数として表す.

2.2 帰着と困難性

言語 $L \subseteq \{0, 1\}^*$ は関数 $L: \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}$ と同一視し, $u \in L$ のとき $L(u) = 1$ とする.

定義 2.4 (帰着). 言語 L が実関数 $f: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ に帰着するとは, 多項式時間計算可能な関数 S と多項式時間神託機械 M が存在し, 任意の文字列 u に対して以下を満たすことをいう (図 2.2).

- $S(u, \cdot)$ はある実数 x_u の名;
- $f(x_u)$ の任意の名 ϕ に対して

$$M^\phi(u) \text{ が受理} \Leftrightarrow u \in L.$$



図 2.2 言語 L から関数 $f: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ への帰着



図 3.1 差分方程式 G とその解 H

この定義は河村による帰着の定義と形式上は異なるが、帰着としての強さは等しい。計算量 C に対して、関数 f が C 困難であるとは、 C に属する任意の言語が f に帰着することをいう。

3 証明

本節では次の手順で定理 1.1, 1.2 を示す。まずある種の差分方程式の族が、PSPACE 困難ないし CH 困難であることを示す (3.1 節, 3.2 節)。そしてこの差分方程式が、滑らかさの条件を満たす (1.1) の形の微分方程式の族により模倣されることを示す (3.3 節)。この族を一つの滑らかな微分方程式へ埋め込むことで、定理にいう g, h を構成する (3.4 節)。

このように微分方程式で差分方程式を模倣する考え方は、Lipschitz 条件の場合の証明 [3] にも本質的には既に現れていたものであるが、本稿ではより精密に、滑らかさの条件が与える影響を調べるため、差分方程式をある種の回路族として定義する。その結果、2 回以上連続微分可能という制限の下でも、回路の深さが小さければ模倣できることが判り、そのことから CH 困難性が従う。

3.1 差分方程式

この節では微分方程式 (1.1) の離散版ともいうべき差分方程式をある種の一様な回路族として定義し、それが深さの制限に応じて PSPACE 困難ないし CH 困難であることを示す。

$[n] = \{0, \dots, n-1\}$ と書く。関数 $G: [P] \times [Q] \times [R] \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ と $H: [P+1] \times [Q+1] \rightarrow [R]$ が任意の $i \in [P], T \in [Q]$ について以下を満たすとき (図 3.1), H を差分方程式 G の解と呼ぶ。

$$H(i, 0) = H(0, T) = 0 \quad (3.1)$$

$$H(i+1, T+1) - H(i+1, T) = G(i, T, H(i, T)) \quad (3.2)$$

P, Q, R をそれぞれこの差分方程式の段数, 列数, 欄の大きさと呼ぶ. (1.1) の初期条件 $h(0) = 0$ と方程式 $Dh(t) = g(t, h(t))$ がそれぞれ式 (3.1), (3.2) に似ており, 3.3 節ではこれを用いて微分方程式で差分方程式を模倣する.

文字列 u ごとに一つの差分方程式 G_u を与え, u が言語 L に属するかをその差分方程式によって計算することを考える. 各 u に対して G_u の段数と列数, 解をそれぞれ P_u, Q_u, H_u としたとき, 言語 L が関数族 $(G_u)_u$ によって認識されるとは, $H_u(P_u, Q_u) = L(u)$ を満たすこととする.

族 $(G_u)_u$ が一様であるとは, G_u の段数, 列数, 欄の大きさそれぞれを u を入力とする関数と見做したときそれらが多項式時間計算可能であり, かつ与えられた (u, i, T, Y) から $|u|$ の多項式時間で $G_u(i, T, Y)$ が計算できることと定義する. そのようなとき G_u の段数, 列数及び欄の大きさは, $|u|$ の多項式の指数 ($2^{\text{poly}(|u|)}$) で抑えられる. G_u の段数がさらに $|u|$ の多項式, または対数のオーダーで抑えられるとき, 族 $(G_u)_u$ はそれぞれ多項式段, 対数段であるという. この用語を使うと, 河村が Lipschitz 連続な場合の解析に用いた補題 [3, 補題 4.7] は次のように書ける.

補題 3.1. 多項式段の一様な差分方程式族によって認識される PSPACE 困難な言語が存在する^{*3}.

河村 [3] はこの多項式段の一様な差分方程式族を Lipschitz 連続な微分方程式で模倣することで, 表 1.1 第三行の結果を得た. 本稿の定理 1.1 はこの構成に手を加えて, $(\infty, 1)$ 回微分可能な模倣に作り替えることにより (3.3, 3.4 節), やはり補題 3.1 から得られる.

本稿では更に, 対象とする差分方程式族を対数段に制限すれば, $(\infty, 2)$ 回以上微分可能な関数によっても模倣できることを示し (3.3, 3.4 節), これと次の補題から定理 1.2 を得る.

補題 3.2. 対数段の一様な差分方程式族によって認識される CH 困難な言語が存在する.

計数階層 CH の定義及び補題 3.2 の証明は 3.2 節にて行う.

3.2 計数階層と対数段の差分方程式

計数階層 (Counting Hierarchy) CH は Wagner によって導入された計算量クラスである [13]. 多項式階層 PH が NP の神託機械を用いて

$$\Sigma_0^P = P \quad \Sigma_{n+1}^P = \text{NP}^{\Sigma_n^P} \quad \text{PH} = \bigcup_n \Sigma_n^P$$

と定義されるのに対し, 計数階層は多項式階層の NP を PP で置き換えて

$$\text{C}_0\text{P} = P \quad \text{C}_{n+1}\text{P} = \text{PP}^{\text{C}_n\text{P}} \quad \text{CH} = \bigcup_n \text{C}_n\text{P}$$

^{*3} 差分方程式によって認識される言語のクラスはカーブ帰着において閉じており, 多項式段一様な関数族によって認識される言語は PSPACE と一致する.

で定義される^{*4}. $\text{PH} \subseteq \text{CH} \subseteq \text{PSPACE}$ だが、いずれも真の包含か否かは未解決である。

各階層 C_nP は次の完全問題 C_nB_{be} をもつ. 量子子 C を自然数 m, l 個の論理変数の組 X , 論理式 $\phi(X)$ について次のように定義する.

$$\text{C}^m X \phi(X) \longleftrightarrow |\{X \in \{0, 1\}^l \mid \phi(X) = 1\}| \geq m. \quad (3.3)$$

$\text{C}^1 = \exists, \text{C}^{2^l} = \forall$ であり, C は \exists, \forall の一般化と言える. 言語 C_nB_{be} を次のように定義する.

$$\langle \phi(X_1, \dots, X_n), m_1, \dots, m_n \rangle \in \text{C}_n\text{B}_{be} \longleftrightarrow \text{C}^{m_1} X_1 \cdots \text{C}^{m_n} X_n \phi(X_1, \dots, X_n) \quad (3.4)$$

ただし X_i は論理変数の組, $\phi(X_1, \dots, X_n)$ は X_1, \dots, X_n 以外の変数を持たない論理式とする.

補題 3.3 ([13, 定理 7]). C_nB_{be} は C_nP 完全.

これらの問題 C_nB_{be} から問題 $\text{C}_{\log}\text{B}_{be}$ を次で定義する.

$$\langle 0^{2^n}, u \rangle \in \text{C}_{\log}\text{B}_{be} \longleftrightarrow u \in \text{C}_n\text{B}_{be} \quad (3.5)$$

この $\text{C}_{\log}\text{B}_{be}$ が補題 3.2 で求める言語であること, つまり CH 困難かつ対数段一様関数族によって認識可能であることを示す.

補題 3.2 の証明. $\text{C}_{\log}\text{B}_{be}$ が CH 困難であることを示す. 任意の CH の言語 A はある階層 C_nP に属する. 補題 3.3 より任意の $u \in \{0, 1\}^*$ について $u \in A \leftrightarrow f(u) \in \text{C}_n\text{B}_{be}$ を満たす多項式時間関数 f が存在する.

$$u \in A \longleftrightarrow \langle 0^{2^n}, f(u) \rangle \in \text{C}_{\log}\text{B}_{be} \quad (3.6)$$

n は定数であるため $\langle 0^{2^n}, f(\cdot) \rangle$ は多項式時間関数. よって A は $\text{C}_{\log}\text{B}_{be}$ に帰着する.

$\text{C}_{\log}\text{B}_{be}$ を認識する関数族 $(G_u)_u$, その解 $(H_u)_u$, 及び $G_u: [p(|u|)] \times [2^{q(|u|)}] \times [2^{r(|u|)}] \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ を満たす関数 $p: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, 多項式 q, r を構成する. 自然数 n, m_1, \dots, m_n , 論理式 ϕ を $u = \langle 0^{2^n}, \langle \phi(X_1, \dots, X_n), m_1, \dots, m_n \rangle \rangle$ を満たすものとする. (そのような n, m_1, \dots, m_n, ϕ が存在しないとき $u \notin A$.)

関数 $\text{C}^m: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ を

$$\text{C}^m(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq m) \\ 0 & (x < m) \end{cases} \quad (3.7)$$

と定義する. $l_i = |X_i|$ と表記し, 任意の $i \in \{0, \dots, n\}$ と $n - i$ 個の文字列 $Y_{i+1} \in \{0, 1\}^{l_{i+1}}, \dots, Y_n \in \{0, 1\}^{l_n}$ について論理式 $\text{C}^{m_i} X_i \cdots \text{C}^{m_1} X_1 \phi(X_1, \dots, X_i, Y_{i+1}, \dots, Y_n)$ の真偽値を $\phi_i(Y_{i+1}, \dots, Y_n)$ と表記する.

$$\phi_0(Y_1, \dots, Y_n) = \phi(Y_1, \dots, Y_n) \quad (3.8)$$

$$\phi_{i+1}(Y_{i+2}, \dots, Y_n) = \text{C}^{m_{i+1}} \left(\sum_{X_{i+1} \in \{0, 1\}^{l_{i+1}}} \phi_i(X_{i+1}, Y_{i+2}, \dots, Y_n) \right) \quad (3.9)$$

$$\phi_n() = \text{C}_{\log}\text{B}_{be}(u) \quad (3.10)$$

^{*4} ただしこの特徴づけは Torán によるものであり, Wagner による定義とは異なる [12].

$T \in \mathbb{N}$ に対し, T_i を T の 2 進表記における i 桁目, $T_{[i,j]} = T_{j-1}T_{j-2} \cdots T_{i+1}T_i$ と表記する.

$s_i = i + \sum_{j=1}^i l_j$ と書く. G_u を $(i, T, Y) \in [n+1] \times [2^{s_n} + 1] \times [2^{|u|}]$ の範囲で以下のように定義する. 一段目つまり $i = 0$ ならば

$$G_u(0, T, Y) = (-1)^{T_{s_1}} \phi(T_{[1,s_1]}, T_{[s_1+1,s_2]}, \dots, T_{[s_{n-1}+1,s_n]}) \quad (3.11)$$

$i \geq 1$ ならば

$$G_u(i, T, Y) = \begin{cases} (-1)^{T_{s_{i+1}}} C^{m_i}(Y) & (T_{[1,s_i]} = 10 \cdots 0) \\ 0 & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (3.12)$$

任意の $i \in [n+1]$, $T \in [2^{s_n} + 1]$ について, $H_u(i, T) \in [2^{l_i} + 1]$ が成り立つこと, および $T_{[1,s_i]} = 10 \cdots 0$ ならば

$$G_u(i, T, H_u(i, T)) = (-1)^{T_{s_{i+1}}} \phi_i(T_{[s_i+1,s_{i+1}]}, \dots, T_{[s_{n-1}+1,s_n]}) \quad (3.13)$$

を満たすことを i についての帰納法により示す. 上記が成り立つとき, $i = n$, $T = 2^{s_n}$ において $G_u(n, 2^{s_n}, H_u(n, 2^{s_n})) = \phi_n() = C_{\log B_{be}}(u)$ よって $H_u(n+1, 2^{s_n} + 1) = C_{\log B_{be}}(u)$. ここで

$$n+1 \leq \log(|0^{2^n}|) + 1 = O(\log(|u|)) \quad (3.14)$$

$$2^{s_n} + 1 \leq 2^{s_{n+1}} \leq 2^{|u|} \quad (3.15)$$

より $p(u) = n+1, q(x) = r(x) = x$ とおき G_u を $[p(u)] \times [2^{q(|u|)}] \times [2^{r(|u|)}]$ の範囲に拡張すると $H_u(p(u), 2^{q(|u|)}) = C_{\log B_{be}}(u)$.

$i = 0$ のとき, 式 (3.12) より成り立つ. $i = j$ のとき, 成り立つと仮定する.

$$H_u(j+1, T) = \sum_{V=0}^{T-1} G_u(j, V, H_u(j, V)) \quad (3.16)$$

$$= \sum_V (-1)^{V_{s_{j+1}}} \phi_j(V_{[s_j+1,s_{j+1}]}, \dots, V_{[s_{n-1}+1,s_n]}) \quad (3.17)$$

文字列 U に対して, U を 2 進数と解釈した時の値を \overline{U} と表記する. $V \leq \overline{T_{[s_{j+1}+1,s_n]}0 \cdots 0}$ の範囲に措いては $\phi_j(V_{[s_j+1,s_{j+1}]}, \dots, V_{[s_{n-1}+1,s_n]})$ と $-\phi_j(V_{[s_j+1,s_{j+1}]}, \dots, V_{[s_{n-1}+1,s_n]})$ が互いに打ち消し合うので,

$$H_u(j+1, T) = \sum_{X \in \{0,1\}^{l_j}} \phi_j(X, T_{[s_{j+1}+1,s_{j+2}]}, \dots, T_{[s_{n-1}+1,s_n]}) \quad (3.18)$$

式 (3.9) より

$$G_u(j+1, T, H_u(j+1, T)) = (-1)^{T_{s_{j+2}}} C^{m_{j+1}}(H_u(j+1, T)) \quad (3.19)$$

$$= (-1)^{T_{s_{j+2}}} \phi_{j+1}(T_{[s_{j+1}+1,s_{j+2}]}, \dots, T_{[s_{n-1}+1,s_n]}) \quad (3.20)$$

よって $i = j+1$ でも成り立つ. □

3.3 差分方程式を模倣する関数族

次に前節で示した PSPACE または CH 困難な各差分方程式を滑らかな実関数で模倣可能であることを示す.

まず実関数の多項式時間計算可能性を実関数の族に拡張する. 文字列 u で添字づけられた実関数 $f_u: A \rightarrow \mathbf{R}$ の族 $(f_u)_u$ を機械 M が計算するとは, 任意の実数 $x \in A$, 任意の x の名 ϕ_x に対して, 文字列 v を $M^{\phi_x}(u, v)$ へ移す関数が, $f_u(x)$ の名であることをいう. 実関数族が多項式時間計算可能であるとは, その実関数族を計算する多項式時間神託機械が存在することである.

補題 3.4. CH 困難な言語 L と多項式 μ が存在し, 任意の正の整数 k , 任意の多項式 γ に対して, 多項式 ρ , 実関数族 $(g_u)_u, (h_u)_u$ で, $(g_u)_u$ は多項式時間計算可能であり, 各文字列 u に対して以下を満たすものが存在する.

- (i) $g_u: [0, 1] \times [-1, 1] \rightarrow \mathbf{R}, h_u: [0, 1] \rightarrow [-1, 1]$.
- (ii) g_u と h_u は方程式 (1.1) を満たす.
- (iii) g_u は (∞, k) 階連続微分可能.
- (iv) 任意の $i \in \mathbf{N}, y \in [-1, 1]$ に対して $D^{(i,0)}g_u(0, y) = D^{(i,0)}g_u(1, y) = 0$.
- (v) 任意の $i \in \mathbf{N}, j \in \{0, \dots, k\}$ に対して $|D^{(i,j)}g_u(t, y)| \leq 2^{\mu(i, |u|) - \gamma(|u|)}$.
- (vi) $h_u(1) = 2^{-\rho(|u|)}L(u)$.

補題 3.5. PSPACE 困難な言語 L と多項式 μ が存在し, $k = 1$ のとき, 任意の多項式 γ に対して, 多項式 ρ , 実関数族 $(g_u)_u, (h_u)_u$ で, $(g_u)_u$ は多項式時間計算可能であり, 各文字列 u に対して補題 3.4 の (i) – (vi) を満たすものが存在する.

この補題より各 $h_u(1)$ に $L(u)$ の情報を持つ滑らかな実関数族 $(g_u)_u, (h_u)_u$ の存在が示される. 河村による Lipschitz 連続な常微分方程式の PSPACE 困難性の証明における, 補題 4.1 に対応するが, g を微分可能にするため, 条件 (iii) – (v) が付け加えられている.

この補題の証明の基本的な流れを説明する. ある CH 困難 (resp. PSPACE 困難) な言語 L に対し, 補題 3.2 (resp. 補題 3.1) を用いて L を認識する $(G_u)_u$ 及び $(H_u)_u$ を得る. 各 $T/2^{q(|u|)} \in [0, 1]$ において $h_u(T/2^{q(|u|)}) = \sum_i^{p(|u|)} H_u(i, T)/B^{d_u(i)}$ を満たすように h_u を構成し, G_u から g_u を構成する. ここで d_u は差分方程式の段を実数の何桁目に埋め込むかという割り当てである. それらが方程式 (1.1) を満たすことを差分方程式の性質により示し, $(g_u)_u$ の多項式時間計算可能性を $(G_u)_u$ の一様性から示す.

河村 [3, 補題 4.1] の構成と違って g_u を滑らかにする必要があるため, 以下のような無限回微分可能な関数 $f: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ を用いる.

補題 3.6 ([7, 補題 3.6]). 以下を満たす多項式時間計算可能で無限回微分可能な関数 $f: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ 及び多項式 s が存在する.

- (i) $f(0) = 0, f(1) = 1$.
- (ii) 任意の $n \geq 1$ について, $D^n f(0) = D^n f(1) = 0$.
- (iii) f は単調増加.
- (iv) 任意の $n \geq 1$ について, $D^n f$ は多項式時間計算可能.
- (v) 任意の $n \geq 1$ について, $|D^n f| \leq s(n)$.

葛 [7, 補題 3.6] には条件 (v) を満たす多項式 s の存在が明示されていないが, 容易に示される.
 ここではより難しく一般的な補題 3.4 のみ証明を行い, 補題 3.5 について証明は省略する.

補題 3.4 の証明. 補題 3.2 より CH 困難な言語 L を認識する対数段一様関数族 $(G_u)_u$, その解 $(H_u)_u$ を得る. 対数段一様関数族の定義より $G_u: [p(|u|)] \times [2^{q(|u|)}] \times [2^{r(|u|)}] \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ を満たす関数 p , 多項式 q, r が存在する.

河村による証明と同様に $(G_u)_u, (H_u)_u$ を拡張することにより, 以下のことを仮定してよい.

$$H_u(i, 2^{q(|u|)}) = \begin{cases} L(u) & (i = p(|u|)) \\ 0 & (i < p(|u|)) \end{cases} \quad (3.21)$$

$$i \neq j_u(T) \rightarrow G_u(i, T, Y) = 0 \quad (3.22)$$

$p(x) = O(\log x)$ より任意の $x \in \mathbf{N}$ に対して, $(k+1)^{p(x)} \leq \sigma(x)$ を満たす多項式 σ が存在する.
 B と関数 $d_u: [p(|u|) + 1] \rightarrow \mathbf{N}$ を

$$B = 2^{\gamma(|u|) + r(|u|) + s(k) + k + 3} \quad d_u(i) = \begin{cases} \sigma(|u|) & (i = p(|u|)) \\ (k+1)^i & (i < p(|u|)) \end{cases} \quad (3.23)$$

とおく. 各 $(t, y) \in [0, 1] \times [-1, 1]$ に対して, $t = (T + \theta)2^{-q(|u|)}$, $y = (Y + \eta)B^{-d_u(j_u(T))}$ を満たす自然数 N , $\theta \in [0, 1)$, 整数 $Y, \eta \in [-1/4, 3/4]$ がそれぞれ唯一存在する. 関数 $\delta_{u,Y}: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ を

$$\delta_{u,Y}(t) = \frac{2^{q(|u|)} Df(\theta)}{B^{d_u(j_u(T)+1)}} G_u(j_u(T), T, Y \bmod 2^{r(|u|)}) \quad (3.24)$$

とおき, g_u, h_u を以下のように定義する.

$$g_u(t, y) = \begin{cases} \delta_{u,Y}(\theta) & (\eta \leq \frac{1}{4}) \\ (1 - f(\frac{4\eta-1}{2}))\delta_{u,Y}(\theta) + f(\frac{4\eta-1}{2})\delta_{u,Y+1}(\theta) & (\eta > \frac{1}{4}) \end{cases} \quad (3.25)$$

$$h_u(t) = \sum_{i=0}^{p(|u|)} \frac{H_u(i, T)}{B^{d_u(i)}} + \frac{f(\theta)}{B^{d_u(j_u(T)+1)}} G_u(j_u(T), T, H_u(j_u(T), T)) \quad (3.26)$$

ただし f と多項式 s は補題 3.6 を満たすものとする.

上記のように定義した g_u, h_u が補題 3.5 で求める性質を満たすことを示す. ただし多くは河村による証明と同様に示せるため, [3, 補題 4.1] と異なる条件 (iii) – (vi) のみ示す

g_u が (∞, k) 回連続的微分可能であることを示す. η が $[-1/4, 1/4]$ と $(1/4, 3/4)$ である区間それぞれにおいて微分する. 任意の $i \in \mathbb{N}$ について

$$D^i \delta_{u,Y}(t) = \frac{2^{(i+1)q(|u|)} D^{i+1} f(\theta)}{B^{d_u(j_u(T)+1)}} G_u(j_u(T), T, Y \bmod 2^{r(|u|)}) \quad (3.27)$$

$$D^{(i,0)} g_u(t, y) = \begin{cases} D^i \delta_{u,Y}(\theta) & (-\frac{1}{4} < \eta < \frac{1}{4}) \\ (1 - f(\frac{4\eta-1}{2})) D^i \delta_{u,Y}(\theta) + f(\frac{4\eta-1}{2}) D^i \delta_{u,Y+1}(\theta) & (\frac{1}{4} < \eta < \frac{3}{4}) \end{cases} \quad (3.28)$$

$j \in \{1, \dots, k\}$ について,

$$D^{(i,j)} g_u(t, y) = \begin{cases} 0 & (-\frac{1}{4} < \eta < \frac{1}{4}) \\ (2B^{d_u(j_u(T))})^j D^j f(\frac{4\eta-1}{2}) (D^i \delta_{u,Y+1}(\theta) - D^i \delta_{u,Y}(\theta)) & (\frac{1}{4} < \eta < \frac{3}{4}) \end{cases} \quad (3.29)$$

境界においても連続であるため, g_u は (∞, j) 階連続的微分可能であることが示された. 式 (3.28) に $t = 0, 1$ ($\theta = 0$) を代入して $D^{(i,0)} g_u(0, y) = D^{(i,0)} g_u(1, y) = 0$.

(v) を示す. 多項式 μ を $\mu(x, y) = (x+1)q(y) + s(x+1)$ とおく. この μ は k や γ に依存しない. 式 (3.24) より $|D^i \delta_{u,Y}(t)| \leq 2^{(i+1)q(|u|)+s(i+1)} B^{-d_u(j_u(|u|)+1)}$. 任意の $i \in \mathbb{N}$, $j \in \{0, \dots, k\}$ について

$$|D^{(i,j)} g_u| \leq 2^k B^{k \cdot j_u(T)} 2^{s(k)} \cdot 2 \cdot \frac{2^{(i+1)q(|u|)+s(i+1)}}{B^{d_u(j_u(|u|)+1)}} \leq \frac{2^{\mu(i,|u|)+s(k)+k+1}}{B} \quad (3.30)$$

B のとり方により, $|D^{(i,j)} g_u| \leq 2^{\mu(i,|u|)-\gamma(|u|)}$.

$\rho(x) = \sigma(x) \cdot (\gamma(x) + r(x) + s(k) + k + 3)$ とおくと,

$$h_u(1) = \frac{H_u(p(|u|), 2^q(|u|))}{B^{d_u(p(|u|))}} = \frac{L(u)}{2^{\sigma(|u|) \cdot (\gamma(|u|) + r(|u|) + s(k) + k + 3)}} = 2^{-\rho(|u|)} L(u). \quad (3.31)$$

□

補題 3.5 の証明では d_u を $d_u(i) = i$ と置き換える. PSPACE 困難な言語を認識する多項式段一様関数族 $(G_u)_u$ とその解 $(H_u)_u$ に対して, 式 (3.25), (3.26) により $(g_u)_u$ と $(h_u)_u$ を定義する. それらが補題 3.5 で求める性質を満たすことは, 補題 3.4 の証明と同様に示される.

3.4 主定理の証明

証明の概略を示す. 前の節の補題から得られる $(g_u)_u$ と $(h_u)_u$ を縮小して連結し滑らかな g と解 h を構成する. $[0, 1)$ を無限の区間に分割し, 各文字列 u に対応する区間 $[l_u^-, c_u]$ に h_u を縮小して埋め込む. ただし次の文字列 u' の計算に影響を与えないために, h_u を定義域方向について反転したものを区間 $[c_u, l_u^+]$ に埋め込むことで影響を相殺する. つまりある多項式 ρ' に対して $h(l_u^-) = 0$, $h(c_u) = 2^{-\rho'(|u|)} L(u)$, $h(l_u^+) = 0$ を満たすように h を構成する. 同様に g と h が方程式 (1.1) を満たすよう, 各文字列 u に対応する区間に g_u を縮小して埋め込むことで g を構成する.

定理 1.1 と定理 1.2 の関係は補題 3.5 と補題 3.4 の関係と等しい. つまり PSPACE が CH に置き換わり, $(\infty, 1)$ 回連続微分可能が (∞, k) 回連続微分可能に一般化されている. よって定理 1.1 の証明は定理 1.2 の証明から構成できるため省略する.

定理 1.2 の証明. L を CH 困難な言語とおく. L に対して補題 3.5 を用いて, まず多項式 μ をえる.

$$\lambda(x) = 2x + 2, \quad \gamma(x) = x\mu(x, x) + x\lambda(x) \quad (3.32)$$

とおき, 各 u に対して

$$\Lambda_u = 2^{\lambda(|u|)}, \quad c_u = 1 - \frac{1}{2^{|u|}} + \frac{2\bar{u} + 1}{\Lambda_u}, \quad l_u^\mp = c_u \mp \frac{1}{\Lambda_u} \quad (3.33)$$

とおく. ただし $\bar{u} \in \{0, \dots, 2^{|u|} - 1\}$ は u を二進数として解釈した数. γ に対して, 補題より $\rho, (g_u)_u, (h_u)_u$ を得る.

任意の $[0, 1)$ の実数に対して, $l_u^\mp \pm \frac{t}{\Lambda_u}$ がその実数と等しくなるような $u, \pm, t \in [0, 1]$ が存在する. 関数 g, h を $t \in [0, 1), y \in [-1, 1]$ に対して,

$$g\left(l_u^\mp \pm \frac{t}{\Lambda_u}, \frac{y}{\Lambda_u}\right) = \begin{cases} \pm \sum_{l=0}^k \frac{D^{(0,l)} g_u(t, 1)}{l!} (y-1)^l & (1 < y) \\ \pm g_u(t, y) & (-1 \leq y \leq 1) \\ \pm \sum_{l=0}^k \frac{D^{(0,l)} g_u(t, -1)}{l!} (y+1)^l & (1 < y) \end{cases} \quad (3.34)$$

$$h\left(l_u^\mp \pm \frac{t}{\Lambda_u}\right) = \frac{h_u(t)}{\Lambda_u}. \quad (3.35)$$

$t = 1$ のとき $g(1, y) = 0, h(1) = 0$ と定義する.

この g が多項式時間計算可能であり g と h が方程式 (1.1) を満たすことは, Lipschitz 条件の場合と同様に示されるため, 河村による証明を参照されたし [3, 定理 3.2]. ここでは特に g が (∞, k) 回連続微分可能であることのみ示す.

g_u は (∞, k) 階連続的微分可能であるため, 各区間においては (∞, k) 階連続的微分可能である. $i \in \mathbb{N}, j \in \{0, \dots, k\}, t \in (0, 1)$ において

$$D^{(i,j)} g\left(l_u^\mp \pm \frac{t}{\Lambda_u}, \frac{y}{\Lambda_u}\right) = \begin{cases} \pm \Lambda_u^{(i,j)} \sum_{l=j}^k \frac{D^{(i,l)} g_u(t, 1)}{(l-j)!} (y-1)^l & (1 < y) \\ \pm \Lambda_u^{(i,j)} D^{(i,j)} g_u(t, y) & (-1 < y < 1) \\ \pm \Lambda_u^{(i,j)} \sum_{l=j}^k \frac{D^{(i,l)} g_u(t, -1)}{(l-j)!} (y+1)^l & (1 < y) \end{cases} \quad (3.36)$$

$D^{(i,j)} g_u$ は連続であるため $t \in (0, 1), y \neq -1, 1$ において連続. 境界 ($t = 0, 1$ または $y = -1, 1$) において連続であることは, 定義および補題 3.4 (iv) によりしめされる. 第一変数が 1 のとき連続

であることを示す. 補題 3.4 の (v) より

$$\begin{aligned}
\left| D^{(i,j)} g \left(l_u^\mp \pm \frac{t}{\Lambda_u}, \frac{y}{\Lambda_u} \right) \right| &\leq \Lambda_u^{i+j} \sum_{l=j}^k \left(|D^{(i,l)} g_u| (\Lambda_u + 1)^l \right) \\
&\leq \Lambda_u^{i+j+k} 2^{k+\mu(i,|u|)-\gamma(|u|)} \\
&= 2^{(i+j+k)\lambda(|u|)+k+\mu(i,|u|)-\gamma(|u|)}. \tag{3.37}
\end{aligned}$$

γ のとり方により, $|u| \rightarrow \infty$ のとき式 (3.37) は 0 に収束する. よって $\lim_{t \rightarrow 1-0} D^{(i,j)} g(t, y) = g(1, y) = 0$. 以上により g は (∞, k) 階連続的微分可能. \square

4 演算子の計算量

定理 1.1, 1.2 はいづれも関数 g を多項式時間計算可能と仮定した上で解 h の計算量について述べている. しかし微分方程式を「解く」困難さ, すなわち与えられた g から h を求める演算子の計算量は如何であろうか. この問に答えるにはまず実関数を実関数へ写す演算子の計算量を定義することを要する.

実数を入出力する関数の計算量を論ずるには, 実数を文字列関数で表した. 即ち \mathbf{R} の各元の名として文字列関数を使ったのであり, その対応を \mathbf{R} の表現という. 同じように実関数を入出力する演算子の計算量を論ずるには, 実関数を文字列関数で表す. つまり連続な実関数 $h: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ の空間 $C[0, 1]$ や, Lipschitz 連続な実関数 $g: [0, 1] \times [-1, 1] \rightarrow \mathbf{R}$ の空間 $C_L[[0, 1] \times [-1, 1]]$ について, 表現を指定すればよい. 演算子の計算可能性や計算量はその表現に依ることになるが, ここでは [5] に従い, $C[0, 1]$ の表現として δ_\square を, $C_L[[0, 1] \times [-1, 1]]$ の表現として $\delta_{\square L}$ をそれぞれ用いる. δ_\square は関数空間 $C[0, 1]$ の表現として或る意味で自然な唯一のものであることが判っており [4], また $\delta_{\square L}$ は δ_\square に Lipschitz 定数の情報を附加した表現である.

これらの表現では使われる文字列関数の長さが有界でないため, 神託機械の時間・空間を測る方法を二階多項式を使って拡張し, これに基いて多項式空間 **FPSPACE** などの計算量クラスや, 多項式時間 Weihrauch 帰着 \leq_W などの帰着, その下での困難性を定義する [5]. この枠組を上述の実関数の表現と組合せることで, 本稿の結果も以下の如く構成的な形で述べることができる.

実関数 $g \in C_L[[0, 1] \times [-1, 1]]$ を, (1.1) の解 $h \in C[0, 1]$ に対応させる演算子 ODE を考える. ODE は $C_L[[0, 1] \times [-1, 1]]$ から $C[0, 1]$ への部分写像である. [5, 定理 4.9] では表 1.1 第三行の証明を構成的に書き直すことで, ODE が $(\delta_{\square L}, \delta_\square)$ -**FPSPACE**- \leq_W 完全であることが示された. 本稿の定理 1.1 も同じように構成的に書き直すことができる. 即ち ODE を (∞, k) 回連続微分可能な入力に制限したものを ODE_k と書くと,

定理 4.1. ODE_1 は $(\delta_{\square L}, \delta_\square)$ -**FPSPACE**- \leq_W 完全.

これを示すには, 定理 1.1 の証明において関数の構成に使われた情報が入力から容易に得られることを確かめればよく, 新たな技巧を要しないから詳細は省略する. この構成的な主張は非構成的

な主張よりも強いものであり [5, 補題 3.7, 3.8], 定理 1.1 は定理 4.1 の系として従う.

なお定理 1.2 も同様に構成的な形で成り立ち, 各 $k \in \mathbb{N}$ について ODE_k は $(\delta_{\square L}, \delta_{\square})$ -CH- \leq_W 困難であるが, この [5] の枠組における CH を定義するには相対化の扱いについて今少しの議論を要するので別稿で扱う.

5 今後の課題

一つ目の課題は (∞, k) 回連続微分可能の場合について, CH 以上の困難性を言えるのかという点である. 定理 1.2 では便宜上 CH 困難と述べるにとどまっているが, 3.2 節において定義される $C_{\log Bbe}$ にカーブ還元可能な言語のクラスについて困難であるといえる. そのような言語クラスは, 交替性機械を確率的に動作するように拡張し, 交替回数が対数オーダーであるような機械によって認識される言語と等しい. そのようなクラスについての先行研究は存在しておらず, 大変興味深い. また導入でも述べたとおり無限微分可能という制限のもとでの, 常微分方程式の解の計算量については以前不明である.

演算子の計算量については進行中.

謝辞

本研究を遂行し発表するにあたり河村は科学研究費補助金若手研究 (B) 23700009 による援助を受けた. 記して謝意を表する.

参考文献

- [1] E.A. Coddington and N. Levinson. *Theory of Ordinary Differential Equations*. McGraw-Hill, 1955.
- [2] A. Kawamura. Complexity of initial value problems, 2010. To appear in *Fields Institute Communications*.
- [3] A. Kawamura. Lipschitz continuous ordinary differential equations are polynomial-space complete. *Computational Complexity*, 19(2):305–332, 2010.
- [4] A. Kawamura. On function space representations and polynomial-time computability. Dagstuhl Seminar 11411: Computing with Infinite Data, 2011. <http://www.imai.is.s.u-tokyo.ac.jp/~kawamura/dagstuhl.pdf>.
- [5] A. Kawamura and S. Cook. Complexity theory for operators in analysis. In *Proceedings of the 42nd ACM Symposium on Theory of Computing*, pages 495–502. ACM, 2010.
- [6] K.I. Ko. On the computational complexity of ordinary differential equations. *Information and Control*, 58(1-3):157–194, 1983.
- [7] K.I. Ko. *Complexity Theory of Real Functions*. Birkhäuser Boston, 1991.

- [8] K.I. Ko and H. Friedman. Computing power series in polynomial time. *Advances in Applied Mathematics*, 9(1):40–50, 1988.
- [9] W. Miller. Recursive function theory and numerical analysis. *Journal of Computer and System Sciences*, 4(5):465–472, 1970.
- [10] N.T. Müller. Uniform computational complexity of Taylor series. *Automata, Languages and Programming*, pages 435–444, 1987.
- [11] M.B. Pour-el and I. Richards. A computable ordinary differential equation which possesses no computable solution. *Annals of Mathematical Logic*, 17(1-2):61–90, 1979.
- [12] J. Torán. Complexity classes defined by counting quantifiers. *Journal of the ACM (JACM)*, 38(3):752–773, 1991.
- [13] K.W. Wagner. The complexity of combinatorial problems with succinct input representation. *Acta Informatica*, 23(3):325–356, 1986.
- [14] Klaus Weihrauch. *Computable Analysis: An Introduction*. Texts in Theoretical Computer Science. Springer, 2000.