

コンラート・ツェにおける計算機観

——計算機械から汎用情報処理機械へ——

河西 棟馬*

How Konrad Zuse viewed the computer:
From numerical calculator to general information processing machine

Toma KAWANISHI

abstract

Konrad Zuse, a German computer pioneer, is widely known for having made the binary, fully-functional, and programmable computer (Z3), which became operational in 1941. Besides this achievement, he is also known for his work on the first high-level programming language, “Plankalkül,” designed in the middle of 1940s when the Second World War and postwar era confusion disturbed (or stopped) his hardware construction efforts.

There is, however, a kind of gap between these two areas of his work. On the one hand all his computing machines made before 1945 have a lack of conditional branching, and on the other, one can write complicated programs including conditional branching and looping with Plankalkül. Because of this gap, it is almost impossible for his computer to execute programs written in Plankalkül.

Through consideration of his writings in the period of 1935–45, I have attempted to show how Zuse changed his views on the meaning of *Rechnen* (engl. reckoning, computing) during the development of his binary calculation theory, and that his hardware-construction and theoretical programming language design activities had influence on each other. For instance, his hardware-construction works called for a binary calculation method which led to Plankalkül, and conversely, his theoretical works urged him to enable the Z4 to execute conditional branching and stimulated him into making “Planfertigungsgerät”.

* 京都大学文学研究科科学哲学科学史専修修士課程

§1 序

ドイツの土木工学者、発明家であり、コンピュータ開発の先駆者のひとりとされるコンラート・ツーゼ（Konrad Zuse, 1910–1995）は、1941 年に完全動作する二進式・汎用プログラム制御計算機 Z3 を開発した業績で知られている¹。もう一つの見逃すことの出来ない業績として、戦況の悪化及び敗戦によってハードウェア製作が困難となった時期に行われた、高級プログラミング言語プランカルキュール（Plankalkül）の開発構想がある。

ツーゼの代表的な仕事とみなされるこの二つの業績の間には大きな隔たりがある。ツーゼ自身が「ドイツにおける最初の計算機は数値計算向けに設計された」²とのちに振り返っている通り、彼が製作した計算機はどれも数値計算用であり、彼が構想した高級プログラミング言語を実際に走らせる能力を持たない、というのも、Z3 やその後継機 Z4 は外部から穿孔フィルムにより供給された命令に従い自動計算を行うのみであり、計算の過程で処理の流れを変更するような機構を備えていないからである³。

これまでのツーゼ研究は彼の開発した個別の機械のハードウェアの性質を扱ったものの⁴と高級言語に焦点を当てたもの⁵に二分しており、両者の関係にはほとんど焦点があてられてこなかった。この関係に着目しつつ、両者の間の隔たりが、いつ、またどのようにして生じたのか、またそこで生じた隔たりを彼がどう理解していたのかを検討するのが本稿の目的である。

本稿では、まず彼の主要な業績とされる Z シリーズ計算機とプランカルキュールに

¹ 本稿で扱う 1930 年代から 40 年代において、“computer”，ドイツ語であれば“der Rechner”という語はもっぱら人間の計算手を指して用いられていた言葉である（Campbell-Kelly et al. 2014, pp. 52–54, 67–68; Ceruzzi 1998, pp. 1–2）。それゆえ、今後本稿でツーゼが開発した装置に言及する際には「計算機」の呼称を用いる。また開発当時ツーゼは現在プログラムと呼ばれている対象を指して“Rechenplan”（計算計画）の語を用いているが、本稿では計算機への処理命令を記述したものについて一般的に語る際には「プログラム」の語を用い、1930 年代から 40 年代にツーゼが開発した計算機を歴史的に扱う場面でこれに言及する場面では「計算計画」の語を用いることとする。

² Zuse 1980, p. 616.

³ 込み入った方法ではあるものの、条件命令を Z3 の命令セットとループの組み合わせでエミュレートする方法が Rojas（1998）によって示されており、厳密には Z3 が高級言語に対応する能力がないとは言えない。しかしツーゼはそのような手法の存在を知らず、また Rojas が示した技巧により書かれたコードは煩雑にならざるを得ないため、実質的に Z3 には高級言語実装能力がないと言って差し支えないと思われる。

⁴ Ceruzzi 1981 ; Rojas 1998 ; Rojas 2002 ; Speiser 2002.

⁵ Bauer 1972 ; Knuth and Pardo 1980 ; Giloi 1997 ; Bauer 2002.

について概説し、そこで生じている隔たりがどのようなものかを検討する(2節)。続けて、彼の計算機観の変遷に注目しながら、この変化とそれに対するツーゼの対応について考察する(3節)⁶。

§2 Z シリーズ計算機とプランカルキュール

2.1 Z シリーズ計算機

1935年から45年の間に、ツーゼはZ1からZ4までの4つのプログラム可能な計算機を製作した⁷。Z1-Z4は方式とその機能的観点から見て同等であり、その違いは主として使用した素子の種類にあると考えて良い⁸。表1にZ4までの計算機の主だった相違点を示す。

他にも貯蔵部の容量や語長などの相違はあるが、詳細は割愛する。ここでは代表例

⁶ ツーゼの扱いは主に言語障壁の存在ゆえにドイツ語圏とそれ以外で大きく異なる。英語圏においてツーゼは戦後しばらくの間無名であり、彼の存在が知られるようになるのは1960年代以降である(星野1995)。Randellによれば、英語圏でツーゼについて書かれた文献は戦後長らく占領統治下のドイツでZ4の調査にあたった米海軍のLyndonによる報告書(Lyndon 1947)のみであり、それ以降でツーゼの業績が英語圏で紹介されたのは、おそらくDesmonde and Berkling, “Zuse Z3—German predecessor of MARK 1” (1966)が最初であるという(Randell 1982)。とりわけ1936年4月にドイツの特許局に提出された特許申請書類の英訳(Zuse [1936]1982)は多くの先駆的な発想を含んでおり、注目を集めた。以降英語圏でもハード・ソフト両面で彼の研究の紹介が進み、ツーゼは英語圏においても計算機開発の先駆者の一人として広く知られるに至っている。一方のドイツ語圏では1950年代から、ツーゼの計算機を利用していた研究者、たとえばスイス連邦工科大学(ETH)でZ4のプログラムを担当していたHeinz RutishauserやAmbros Speiser、初期の高級プログラミング言語の一つALGOL60の開発に参加し、ツーゼとも親交があったミュンヘン工科大学のFriedrich L. Bauerなどにより、彼の(特にソフトウェア面における)業績を継承した研究がなされてきており、ツーゼの開発活動をその後のドイツ語圏における計算機科学の発展と結びつける試みも存在する(Bauer 1980)。近年ではベルリン自由大学のRaúl Rojasが活発にツーゼの研究を行っており、彼によってZ3がチューリング完全であることの証明(1998)、プランカルキュールを実装するためのコンパイラ開発(2000)、Z3の復元(2005)などがなされている。2010年にはツーゼの生誕100周年を記念していくつかの事業や式典が行われるなど、ドイツ語圏におけるツーゼへの関心は現在も高い。

⁷ Zシリーズ計算機の基本設計を知る上ではZ1の特許申請書とZ3の特許申請書が重要である。以下の紹介ではこれら特許申請書類とCeruzzi (1981), Rojas (2002)を参照した。また、当時ツーゼは自らの計算機をV1-V4(「試作モデル」を意味する“Versuchsmodell”の頭文字を取ったもの)と呼んでおり、Z1-Z4は戦後の呼称である。ほとんどの先行研究が後者の呼称を採用しているため、ここでも通例に従うこととする。

⁸ Ceruzzi 1981, pp. 256-257; Zuse [1984]1993, p. 43; Rojas 2002, pp. 239-240。ここで言う機械式とは、当時一般に使われていた歯車式のものではなく、金属プレートとスライド式の金属棒を使ったものである。この金属棒は前後のいずれか一方にのみ動くことができ、この棒が金属プレートのどちらの位置を取るかによって二つの状態を表現した(Rojas 2002, p. 238)。なお、Zuse ArchivesではZ1の機械式スイッチ素子の動作シミュレーションを見ることが可能である(<http://zuse-z1.zib.de/simulations/z1/switches/simple.html> 2016年1月14日閲覧)。

表 1 Z1-Z4 の製作期間・使用素子・その他相違（Zuse 1980 を改変）

	製作期間	演算部	貯蔵部	その他
Z1	1936-38	機械式	機械式	二進固定小数点数を採用 組み込み演算器に開閉計算器を追加 49-50 年の改良時に条件分岐に対応
Z2	1937-39	電気機械式	機械式	
Z3	1938-41	電気機械式	電気機械式	
Z4	1942-45	電気機械式	機械式	

として Z3 の仕様を紹介することによって Z シリーズ計算機全体の紹介に代えることとしたい⁹。

Z3 は、演算部（Rechenwerk）と貯蔵部（Speicherwerk）の分離や命令の逐次処理、貯蔵部へのランダムアクセス、二進浮動小数点数の採用、指数と仮数の並列演算、四則演算・平方根計算用組み込み演算器の導入など、多くの先進的特徴を備えていた¹⁰。素子としては 2,600 個の電気機械式リレーを採用していたが、後述する通りツーゼは電子式の採用による高速化の可能性も認識していた。

Z3 においてプログラムはフィルム上の穿孔の配列により、1 命令につき 8 ビットでコーディングされる。命令には入出力・貯蔵・演算の 3 種類があり、2 ビットがこの演算の種類を識別するために用いられ、残りの 6 ビットは入出力の識別、貯蔵部のアドレス指定、演算の種類（加減乗除および平方根）の指定に用いられた¹¹。入出力型の命令が読み込まれた場合には、Z3 は一時停止するように設定されており、その間にこれを操作する人間はキーボードを通じて引数を入力したり、ディスプレイランプに表示された数値を書き取ることができるようになっていた。表 2 に Z3 の命令セットを示しておく。

プログラムの概要については具体例をみた方がわかりやすい。簡単な計算を Z3 のコードに書き直すと、例えば $x^2 + bx$ は表 3 のように表せる（定数 b をアドレス 2 に、変数 x をアドレス 1 に貯蔵しているものとする）。

表 2 に示した命令セットを見てもわかる通り、Z3 には条件分岐命令およびループ

⁹ 以下、断りが無い限りツーゼの一次資料については Zuse Archives (<http://zuse.zib.de>) にアップロードされているものを使用した。本アーカイブはツーゼ生誕 100 周年事業の一環として、ベルリン自由大学、ドイツ博物館 (Deutsches Museum)、ドイツ学術振興会 (Deutsche Forschungsgemeinschaft) の協力により整備されたものである。オリジナルは現在ドイツ博物館に所蔵されている。

¹⁰ Ceruzzi 1981, p. 254.

¹¹ これに合わせて Z3 の貯蔵容量は $2^6 = 64$ 語となっている。

表2 Z3 の命令セット (Rojas 2002 p. 243; Zuse 1941 pp. 29-31.)

命令タイプ	命令コード	内容	オペコード
I/O	Lu	キーボード読み込み	01 110000
I/O	Ld	ディスプレイ出力	01 111000
貯蔵部	Pr z	アドレス z をロード	11 $z_5z_4z_3z_2z_1z_0$
貯蔵部	Ps z	アドレス z にストア	10 $z_5z_4z_3z_2z_1z_0$
演算	Lm	乗算	01 001000
演算	Li	除算	01 010000
演算	Lw	平方根	01 011000
演算	Ls1	加算	01 100000
演算	Ls2	減算	01 101000

表3 $x^2 + bx$ のコード例 (Rojas 2002 を改変)

命令	アドレス	解説
Pr	1	アドレス 1 にある x をレジスタ 1 にロード
Pr	1	アドレス 1 にある x をレジスタ 2 にロード
Lm	None	レジスタ 1 とレジスタ 2 を乗算, 結果をレジスタ 1 へ
Ps	3	レジスタ 1 の値をアドレス 3 へ保存し, レジスタ 1 をクリア
Pr	1	アドレス 1 にある x をレジスタ 1 にロード
Pr	2	アドレス 2 にある b をレジスタ 2 にロード
Lm	None	レジスタ 1 とレジスタ 2 を乗算, 結果をレジスタ 1 へ
Pr	3	アドレス 3 にある x^2 をレジスタ 2 にロード
Ls	1	レジスタ 1 とレジスタ 2 を加算, 結果をレジスタ 1 へ
Ld	None	結果をディスプレイに表示

命令が欠けている。ループは穿孔フィルムの両端を接着するという素朴な方法によって実装できるが、条件分岐命令の不在はそのような単純な方法で補えるものではない。以下で見るように、プランカルキュールが想定していた論理的な処理において条件分岐は必須であり、そのため Z シリーズ計算機にこれが欠けていたことには注意が必要である。

2.2 プランカルキュール

ツーゼがプランカルキュールの開発を行ったのは、主に第二次大戦の激化と敗戦による混乱によりハードウェア製作作業の中断を余儀なくされた 1945 年から 1946 年頃の時期である¹²。

プランカルキュールは例えばチェスの試合のような高度な論理的処理を行うことをその目標としており¹³、if 文や繰り返しを行うための while 文に相当する制御構文が備わっている。例えば、繰り返しを行うプログラムをツーゼは反復計画 (Wiederholungsplan, W-Plan) と呼び、その構文を次のように紹介している¹⁴。

$$W \left[\begin{array}{l} F \rightarrow P \\ \overline{F} \Rightarrow Fin^2 \end{array} \right] \quad (1)$$

反復計画は括弧でくくられ、直前に置かれた W によってそうと分かるようになっている。 F は命題論理式を表し、 P が実際に反復される処理である。記号 $\rightarrow$ は if に相当する役割をもつ記号であり、この記号の前にある命題論理式が真である場合のみ、後の式が実行される¹⁵。つまりこの場合であれば F が真の場合 P が実行され、 $\overline{F}$ (つまり F が偽) の場合に繰り返しは終了する。 Fin は処理を打ち切るための記号である。この繰り返し構文は入れ子にすることも可能であった¹⁶。

データの型も数値に限らず、ほとんどあらゆるデータを扱うことができるようになっていた。ツーゼによれば「データ (Angabe) は極めて多様で、例えば数、命題、名前、アドレス、座標等になりうる。これらはその構造によって区別される。最も簡単

¹² Zuse 1980, pp. 613–614. 彼がプランカルキュールについて公表した文書には 1948 年に投稿され翌 49 年にドイツの数学誌 *Archiv der Mathematik* に発表された “Über den Allgemeinen Plankalkül als Mittel zur Formulierung schematisch-kombinativer Aufgaben” (Zuse 1949) と、1959 年にドイツの情報学誌 *it — Informationstechnik* に公表された “Über den Plankalkül” (Zuse 1959) の 2 つがあるが、どちらも断片的な紹介にとどまり、1972 年にドイツ数学・情報処理学会 (Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung, GMD) に “Der Plankalkül” と題した文書が提出されるまで全容が明らかにされることはなかった。ここでの紹介は Zuse (1949)、Rojas の校訂による 1945 年草稿 (Zuse 1945)、Bauer (2002) に依った。

¹³ 例えば Zuse (1980) には、プランカルキュールで記述されたチェスの盤面からチェックメイトあるいはスニールメイトかを判定するためのプログラムが紹介されている。

¹⁴ Zuse 1945, p. 26.

¹⁵ Zuse 1945, p. 20.

¹⁶ Zuse 1945, pp. 26, 29. Fin 記号の上付き文字は打ち切り処理の回数を表し、この場合、呼びだされた P という処理の終了とこの W という処理の終了のために打ち切り処理が 2 回必要であることを意味している。また、記号 $\rightarrow$ の前の論理式が偽となれば処理は実行されないため、 Fin 記号は省略が許されていた。

Fig. 3.

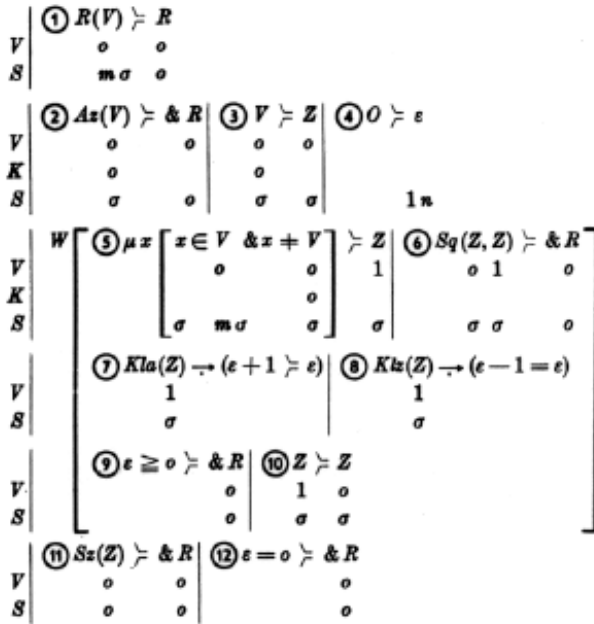


図1 プランカルキュールのコード例 (Zuse 1949, p. 446). ここに書かれているのは、括弧の対応なプログラムの構文をチェックするためのプログラムである。

な構造は Ja-Nein=Werte¹⁷ (例えばある数の符号や、単独の二進数字) である。どんなに複雑なデータであっても Ja-Nein Werte から構成する事ができる¹⁸。こうした構造はプログラム中で指定することもできるが、構造変数 (ein variables Strukturzeichen) を用いることで動的な型付けを行うことも出来るはずであった¹⁹。

のちの関数ないしはサブルーチンに相当する概念も存在する。下位計画 (Unterplan)

¹⁷ Ceruzzi (1981) は “yes-no value” としている。ツーゼの採用した表記では記号 L と O の二つが Ja-Nein Werte を表現しており、 L が真理値 “true”, 二進数 “1”, 符号 “+” を、 O が真理値 “false”, 二進数 “0”, 符号 “-” を表す。意味合いとしては二進数の一桁を表す「ビット」に近いが、ここでは原語表記のままとしておく。

¹⁸ “„Angaben“ können sehr verschiedenartig sein, z. B. Zahlen, Aussagen, Namen, Adressen, Koordinaten usw. Sie unterscheiden sich nach ihrer Struktur. Die einfachste Struktur hat der Ja-Nein=Wert (z. B. Vorzeichen einer Zahl, einzelne Dualziffer). Es zeigt sich, daß alle komplizierteren Angaben aus Ja-Nein-Werten[sic] aufgebaut werden können.” (Zuse 1949, p. 442)

¹⁹ Zuse 1949, pp. 442, 447.

がそれであり、必要に応じてプログラマが定義、呼び出すことができた。1945 年に書かれたツーゼの草稿には「計算計画は下位計画に基いて作ることができる。同様に、下位計画を別の下位計画に基いて作ることもできる。ゆえに、下位計画が何重にも入れ子になった状態も生じうる。基本的には、あらゆる計算計画が下位計画となりうる」²⁰ という言明も見られる。

以上確認したとおり、Z3 の命令セットには欠けていた条件判定や繰り返し構文、サブルーチンの定義や呼び出しなどが可能になるなど、プランカルキュールはそれまでツーゼが開発してきた計算機的能力を超えてしまっている。つまり Z シリーズでの実装は出来ない。次節ではこうした隔たりが生じた経緯を追う。

§3 計算機観の変遷

3.1 製作動機と初期構想---計算の順序制御

ツーゼが計算機を製作する契機となったのは、学生時代および航空機エンジニア時代に経験した退屈で膨大な計算であったという²¹。彼が学んでいた土木工学の例を挙げると、3 つ以上の柱で支えられた荷重の分散を計算するには、荷重の大きさ、柱の強度及び弾性を項に含む線形方程式の系を解く必要があった。その計算上の負担は極めて大きく、ときには 30 元もの連立一次方程式を解かねばならないこともあったという。しかし計算量こそ膨大であるものの、こうした方程式を解くための計算は単純な四則演算に帰着させることができることから、ツーゼはこの計算の機械化を検討し始める。彼は学生時代から卓上の機械式計算機に触れる機会があり、当初から個々の演算の機械化にはさしたる困難はないと考えていた。彼が困難を予期していたのはむしろ計算の「交通整備」、つまり計算の順番を整理して、結果をまとめることであった²²。

ツーゼはシャルロッテンブルク工科大学²³ 在学中の 1934 年から計算機の製作を紙上で検討し始める。1935 年に大学を卒業後、彼はヘンシェル航空機製造会社（Henschel Flugzeug Werken）にエンジニアとして就職するも、ここでも膨大な計算に

²⁰ “Rechenpläne können auf Unterplänen aufbauen. Diese können wiederum auf weiteren Unterplänen aufbauen. So kann eine mehrfache Verschachtelung von Unterplänen eintreten. Als Unterplan kann grundsätzlich jeder Rechenplan dienen.” (Zuse 1945, p. 13)

²¹ Zuse 1980, pp. 611–612.

²² Ceruzzi 1981, pp. 241–242.

²³ 現ベルリン工科大学。

悩まされたことから、計算機の製作に専念するためにまもなくして退職する²⁴。

ツーゼは Z1 のハードウェア製作に取り掛かり始めた 1936 年に、当時の着想をまとめたものをドイツの特許局に申請した（申請書の日付は 1936 年 4 月 11 日）。この特許申請書類には開発初期の計算機観が簡潔に述べられている。その冒頭には次のように書かれている。

ここに述べられている発明は、初等的な算術演算の組合せで構成される任意の長さ、任意の構造を持つ、頻繁に繰り返される計算を、計算機械によって自動的に実行するという目標に資するものである。どんな型の計算であれその実行のために必要となるのは、計算計画（Rechenplan）を準備することである。計算計画には、演算がその種類と順番にしたがって連続的に並べられており、計算の過程で生じた数は順番に、あるいは何らかの枠組みにしたがって番号が割り当てられる。（中略）ある特定の問題に対して一度計算計画がセットされたならば、その計算計画はどのような入力値に対しても同様に有効である²⁵。

つまり 1936 年 4 月時点でのツーゼにとって、計算機は事前に用意された計算計画にしたがって計算を実行する、「順序制御式計算機」であったと言えよう。この申請書の上の引用部分に続く箇所では、 3×3 の行列式を解くための計算計画や、三角関数の級数展開を行う計算計画が記述されていることから²⁶、この時点では、計算機が解くべき問題として行列の計算や級数展開などが想定されていたことが推察される。

この申請書には二進浮動小数点数にあたる「準対数表記（halblogarithmische Schreibweise）」も挙げられているほか、演算部と貯蔵部の分離と逐次処理、貯蔵部へのアドレス指定によるアクセスなど、Z3 で用いられている基本的な着想の多くが既に述べられている。その中には「命令が計算を実行する段階に来たら制御装置に送られるよう、

²⁴ Zuse 1980, p. 612 ; Zuse [1984]1993, pp. 33, 61–62. ヘンシェル社には 1941 年に再度徴用されて勤務することになり、その際に彼は動力付き誘導爆弾 Hs 293 およびその後継である Hs 294 などの開発に携わることになる。

²⁵ “Vorliegende Erfindung dient zum Zweck, häufig wiederkehrende Rechnungen beliebiger Länge und beliebigen Aufbaues, die sich aus elementaren Rechenoperationen zusammensetzen, mit Hilfe von Rechenmaschinen selbsttätig durchzuführen. Voraussetzung für jede Art der auszuführenden Rechnungen ist die Aufstellung eines Rechenplanes, in dem die aufeinanderfolgenden Rechenoperationen dem Character und der Reihe nach aufgezeichnet werden, und die im Verlauf der Rechnung auftretenden Zahlen fortlaufend nummeriert oder nach einem anderen Schema geordnet werden, (...) Ist für eine bestimmte Aufgabe ein solcher Rechenplan einmal aufgestellt, so gilt er für sämtliche Variationen der Ausgangswerte.” (Zuse 1936, p. 1) 翻訳に当たっては Randell (1982) 所収の英訳を参考にした。

²⁶ Zuse 1936, pp. 5–6.

計算計画もまた貯蔵されうる。同じ計算を何度も繰り返し実行しなければならない場合のために、計算計画は固定した形で貯蔵される」²⁷ という、プログラム内蔵方式（ただし可変ではない）への言及もあった。

しかし、この構想を高い信頼性をもった形で実現するには 5 年ほどの時間を要した。演算部、貯蔵部ともに機械式であった Z1 は 1938 年に一応完成したものの信頼性が低く、安定的に稼働しなかった。後継機 Z2 では故障が多かった演算部に電気機械式のリレーを採用するが、これも信頼性は低いままであった。そこでツーゼは Z3 を全面的に電気機械式で構成することを決定する。先述の通り Z4 までの Z シリーズ計算機は基本的に同様の方式を共有しているため、1941 年に Z3 が完成するまで、ツーゼの工学的な努力はもっぱら 1936 年時点で既にほぼ出来上がっていた着想の実現とその洗練に向けられたといえよう。

3.2 条件組合せ論の構築と命題計算との出会い

以上に述べたようなハードウェア製作と並行して、ツーゼはのちのプランカルキュールへと繋がる、二進数を利用した計算理論の構築も進めていた。ツーゼは 1935 年頃には既に計算機内部での数表現方式として二進法の採用を決めていたものの、当時彼の知る範囲で実用に供されていた計算機はすべて十進歯車式であったため、彼は自ら二進法による計算機構を考案する必要があった²⁸。

ツーゼは大学時代に自分の専門である土木工学の分野で必要な数学については教育を受けていたものの、その中には当時活発に研究されていた数学基礎論や集合論、数理論理学などは含まれておらず、ブール代数も彼の知る所ではなかった²⁹。そのため彼が二進数を用いた演算器を製作するために最初に参照したのは、17 世紀の数学者・哲学者ライプニッツの二進計算理論であった。これを参考にしてツーゼは 1936 年か

²⁷ “Auch der Rechenplan läßt sich speichern, wobei die Befehle im Takte der Rechnung den Steuervorrichtungen zugeführt werden. Die Rechenpläne lassen sich entsprechend in fester Form speichern, falls die Maschine oft dieselbe Rechnung ausführen soll.” (Zuse 1936, p. 5)

²⁸ Ceruzzi 1981, p. 244. ツーゼが数表現方式に十進法ではなく二進法を採用した理由は定かでないが、彼は自伝の中で二進法の採用により組み込み演算器、とくに乗算器の機械的構成を単純化できるという利点があったことを述懐している (Zuse [1984]1993, p. 43)。二進計算の発想自体は古くからあるが、二進法を用いた計算機械は 1935 年時点ではほぼ知られておらず、ツーゼは計算機に二進計算を導入した人物としては最初期に属する人物である。同時期に二進法を計算機に導入することを考えていた人物としては、1937 年から 42 年にかけて ABC (Atanasof-Berry Computer) を開発したアイオワ州立大学のジョン・アタナソフ (John Atanasoff) らがいる。

²⁹ Ceruzzi 1981, p. 244 ; Zuse [1984]1993, p. 40.

ら 1937 年にかけて「条件組合せ論 (Bedingungskombinatorik)」という、スイッチ回路による計算理論を独自に考案する。彼がこれについて 1937 年にギムナジウム時代の数学教師に意見を求めたところ、ツーゼの条件組合せ論は専門家の間ではブール代数、あるいは命題計算 (Aussagenkalkül) として知られている、という返答を受けとる³⁰。このことはツーゼに強い衝撃を与えたとし、彼はのちに「これは私にとって驚くべきことだった。この数理論理的な代数はギムナジウムの数学の授業でも、大学の講義でも一度も触れられたことがなかった。そして私はヒルベルト・アッカーマン、フレーゲ、シュレーダーといった論理学者について学んだ。当時ブール代数はドイツではほとんど知られていなかった」³¹と振り返っている。ブール代数や論理学を独学で学習しつつ、これを回路構成に応用する研究に取り組み初めたことを契機として、ツーゼは計算およびこれを行う計算機の見方を転換していく³²。1937 年 6 月の日記には次のような記述がある。

それによってあらゆる計算処理と思考処理を解決することが出来る基本処理が存在することに気づいた。機械的頭脳の原始的なタイプは貯蔵部と選別部、2, 3 の要素からなる単純な条件列を処理することが出来る単純な装置から構成される。それを解くのに要する時間を無視するなら、何らかのメカニズムによって把握できるあらゆる思考問題は、このような形式の頭脳によって解くことが理論的に可能でなくてはならない³³。

ツーゼはここで計算と（何らかのメカニズムによって把握することが可能な）思考は同種の処理であると述べているように思われるが、こうした表現は今後の彼の書い

³⁰ Zuse 1984, p. 40. これまでツーゼの自伝に参照する際は英訳 (Zuse [1984]1993) を参照してきたが、以降検討の都合上重要と思われる場合、原著 (Zuse 1984) を適宜参照する。

³¹ *ibid.*

³² この分野を学ぶにあたって使用した書籍として、ツーゼは『記号論理学の基礎 (Grundzüge der theoretischen Logik)』(ヒルベルト・アッカーマン, 1928), 『論理代数講義 (Vorlesungen über die Algebra der Logik)』(シュレーダー, 1890-1905), 『概念記法 (Begriffsschrift)』(フレーゲ, 1879) を挙げている (Zuse 1984, p. 74)。ただし彼が参照した版は定かでない。

³³ “Erkenntnis, daß es Elementaroperationen gibt, in die sich sämtliche Rechen- und Denkopoperationen auflösen lassen. Ein primitiver Typ eines mechanischen Gehirns besteht aus einem Speicherwerk, Wählwerk und einer einfachen Vorrichtung, in der einfache Bedingungsketten von 2-3 Gliedern behandelt werden können. Mit dieser Form des Hirns muß es theoretisch möglich sein, sämtliche Denkaufgaben zu lösen, die von Mechanismen erfaßbar sind, jedoch ohne Rücksicht auf die dazu erforderliche Zeit.” (Zuse 1984, pp. 39-40) ツーゼは Zuse (1984) の中で 1937 年当時の日記を紹介しており、手書きの原典は Zuse Archives で見ることができる。翻訳にあたっては 1993 年の英訳 (Zuse [1984]1993) を参考にした。

たものの中に度々現れることになる。たとえば 1938 年に書かれた論文「一般二進法の導入 (Einführung in die allgemeine Dyadik)」を見てみよう。ライプニッツが二進法による演算を Dyadik という表現で表していたため、ツーゼは自らの条件組合せ論を、ライプニッツの計算理論をより広い範囲に拡張したものとして一般二進法 (Allgemeine Dyadik) とも呼んだ³⁴。この論文は形式的な思考問題 (schematische Denkaufgaben) を機械的に解くための理論を述べたものであり、ライプニッツから学んだ二進数の計算手法及びヒルベルト・アッカーマンらの著作から学んだ命題計算を、2 つの状態を取る素子を用いた回路の組合せによって実現する着想が提示されている³⁵。なお、ここで言う形式的な思考問題としては「方程式、推論、アルゴリズム」といったものが念頭に置かれている。ツーゼによればそうした思考問題には階層があり、数値計算はその最下層に属する。そして、「数値計算は汎用計算の特殊領域の一つに過ぎない」³⁶。当時のツーゼにとって計算とは「与えられたデータから何らかの計算規則にしたがって新しいデータを作り出すこと」³⁷であり、その計算過程がもっとも明快かつ形式化されている四則演算のような数値計算は、ツーゼ自らが拡張した計算概念のうちで最も単純なものとして理解されていた。

計算の対象となるデータ (Angabe) についても「これ [データ] は非常に多様な意味を持ちうる。たとえば、数字、命題、名前、番号、階級、日付、命令、報告、推論などである」³⁸と述べており、計算概念の変更に伴い計算の対象も数値から大幅に拡張されている。こうしたデータを扱うための具体的方法についてはほとんど言及がないが、電信技術に言及しつつ 26 文字のアルファベットを 5 個の二進数の配列でコーディングする発想への言及があり³⁹、のちにプランカルキュールで展開されるデータ

³⁴ Zuse 1938, p. 3.

³⁵ なお、2 つの状態を表現できれば素子は何でもよいとしている (Zuse 1938, p. 5)。クロード・シャノン (Claude Shannon) が修士論文として『継電器とスイッチ回路の記号論的解析 (A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits)』を発表したのが 1937 年であり、オーストリア郵便電信電話局の職員であった Johanna (Hansi) Piesch がスイッチ代数と命題論理を結びつける研究を発表したのが 1939 年である (Zemanek 1991, pp. 53–54; Church 1965, pp. 247–248)。このように 1930 年代の後半に論理学とスイッチ回路の関係性を扱う研究はいくつかの場所で並行して行われており、ツーゼの仕事もその一つとみなすことが出来るであろう。

³⁶ “das Zahlenrechnen nur ein Spezialgebiet des allgemeinen Rechnens ist.” (Zuse 1938, p. 1)

³⁷ “Aus gegebenen Angaben nach einer Rechenvorschrift neue Angaben zu bilden” (*ibid.*)

³⁸ “Dies können sehr verschiedene Bedeutung haben, z.B. Zahlen, Aussagen, Namen, Kennziffern, Dienstgrade, Daten, Befehle, Nachrichten, Schulßfolgerungen u.s.w.” (*ibid.*) 訳文中の [] は引用者による。

³⁹ Zuse 1938, p. 2.

型の発想は 1938 年時点で萌芽的な形で現れてきていることがわかる。

3.3 戦争の勃発と作業の中断---隔たりの拡大

1939 年 9 月、ナチスドイツのポーランド侵攻により第二次大戦が勃発する。これ以降、ツーゼのハードウェア製作活動は徴兵ないしは工場への徴用により時間が奪われて滞りがちとなり、1945 年以降の数年間には完全に中断する。一方、例えば計算計画の検討のような理論的な活動はこうした状況下においても発展させることができた。それゆえ第二次大戦の勃発以降、既に生じていたソフトウェアとハードウェアの間の隔たりはますます広がっていくことになる。

加えて、ヘルムート・シュライヤー⁴⁰を通じて真空管の導入による演算高速化の可能性を認識するようになったツーゼは、それまでの「人間にできる計算を代わりに行うための計算機」から「人間には（あまりにも計算量が多すぎるという理由により）実行が困難な計算を行いうる計算機」へ、さらに進んでいる。以下では、1939-40 年に書かれた報告書「計算機械 (Rechenmaschine)」を参照しつつ、これを確認していきたい。

この報告書はツーゼが徴兵され東部戦線へ兵役に就いていた 1939 年の終わりから 1940 年の初めに執筆されたものである⁴¹。これは当時製作中だった計算機について軍に報告したもので、技術的な内容は少なく具体的な応用に関する言及が多い。この報告書の冒頭でツーゼは自分が開発している計算機について、その課題をこう述べている。

⁴⁰ Helmut Schreyer (1912-84)。ツーゼと同じシャルロッテンブルク工科大学出身で、友人として Z シリーズ計算機の開発当初からツーゼの開発活動を助けた。大学時代は通信工学を専攻しており、電話交換機に使われていた電磁継電器 (リレー) を素子に用いる発想をツーゼに提案したのはシュライヤーである。彼には映写技師として働いた経験もあり、プログラムの供給に廃棄された映画のフィルムを使うことをツーゼに勧めるなど、ツーゼの計算機開発に多大な貢献をした。それだけでなく、シュライヤーはそれまでラジオの拡声器のようなアナログな装置としてしか使われていなかった真空管がスイッチとしての役を果たしうることに基づき、真空管を用いた回路構成の理論で 1941 年に工学博士号を取得している。シュライヤーは 1940-41 年には陸軍総司令部に真空管を導入することでツーゼの計算機を電子化・高速化する提案と資金援助要請を行っているが、これは断られてしまう。その代わりに彼はドイツ航空研究所から少額の資金援助を獲得し、小型の試作モデルを 1942 年末に完成させた (しかしこれは敗戦後廃棄されてしまう)。シュライヤーはレーダー開発などの戦争協力プロジェクトを通じて軍と繋がりを持ち、ツーゼが徴兵を免除されたのはシュライヤーが当局にツーゼの仕事の潜在的価値を訴えたことの影響もあったという (Ceruzzi 1981, pp. 248-250; Zuse [1984]1993, pp. 36-41)。

⁴¹ Zuse 1940, pp. 1, 5. 本文中には 1940 年 1 月とあり、一等兵 (Gefreiter) と軍での階級も記載されている。

1. 特に工学者, 学者, 研究者の代わりに形式的な計算労働を引き受け, そしてそれによって生産的な労働に向けるべき高度な労働能力を自由にとすること
2. 技術的な問題を解くための, 新しい計算方法を可能にすること, そしてそれによって幅広い領域で技術的な進歩を援助すること (たとえば, 航空機の品質向上, 建築業における資材の節約)
3. これまで計算が可能でなかった領域の開発. そしてそれによる科学的認識の深化と, 費用の掛かる実験の省略⁴²

この課題については同じ報告書の 5.1–5.3 節で具体例が提示されている。5.1 節は「本質的にこれまでと変わるところのない計算の合理化」, 5.2 節は「技術的問題解決を解決するための新手法の開発」, 5.3 節は「これまで計算によって近寄ることの出来なかった領域の開拓」と題されており, それぞれが上記の課題の一点目, 二点目, 三点目に対応している。

5.1 節で紹介されているのは最初の計算機製作動機となった計算とほぼ同じものである。そのため特に真新しいものではない。注目すべきは 5.2 節と 5.3 節である。

5.2 節で例として挙げられているのは航空機建造における外郭構造計算 (Berechnung von Schalenkonstruktionen im Flugzeugbau)⁴³ と気象計算 (Wetterrechnung)⁴⁴ である。ツェーは航空機の構造設計や気象予報のような分野は理論的には大きく進歩したにもかかわらず, その計算があまりにも膨大であるという理由で発展が妨げられてきたと述べたうえで, 自らの計算機を使えばこうした問題が (解析的にではなく) 計算的に解を見出させるようになる可能性があるとしている。ツェーは気象予報について述べて, 次のように述べる。

⁴² “1. Insbesondere dem Ingenieur, Wissenschaftler und Forscher schematische Rechenarbeit abzunehmen und somit hoch???[sic] Arbeitskräfte für produktives Arbeiten freizumachen. 2. Neue Berechnungsmethoden zur Lösung technischer Probleme zu ermöglichen und somit den technischen Fortschritt auf den verschiedensten Gebieten zu fördern. (Beispielweise Qualitätserhöhung der Flugzeuge, Materialersparnis im Bauweisen.) 3. Erschließung von Gebieten, die bisher der Rechnung nicht zugänglich waren und somit Vertiefung der wissenschaftlichen Erkenntnis und Ersparung kostspieliger Versuche.” (ibid. p. 1)

⁴³ ツェーが Z3 を用いて計算を行った問題の一つに, 航空機の臨界フラッター周波数を算出するために必要とされた複素行列の計算があるが, ここで言及されているのはそうした類の計算のことかと思われる。フラッターとは高速飛行時に航空機の翼面または舵面が空気圧によって後方に移動し, 翼や舵面の構造に曲げや捻れが生じることで発生する, 高周波数の振動現象を指す。当時この現象が多くの航空機の墜落の原因となっていたが, 計算の困難により理論の進展が遅れていたという (Zuse [1984]1993, p. 63)。

⁴⁴ 気象予報は確かに膨大な計算量という問題により進展を阻まれていた分野の一つである。例えば Nebeker (1995, ch. 6) を参照されたい。

計算を行うのに、あらゆる条件を考慮に入れるための数ヶ月という時間を持つことが出来たとすれば、気象学者はきわめて精確な予報をすることが出来るだろう。もしこの計算機を用いて計算労働を数時間に凝縮することに成功したならば、気象予報改良への道が開かれる⁴⁵。

これは戦後フォン・ノイマンがプリンストン大学高等研究所で追求した方向性にほぼ等しい⁴⁶。航空力学にせよ気象計算にせよ、ここに現れているのは解析的に解くことの困難な問題を数値解析的な手法を用いて解く上で、計算機が有用であるという認識である。さらに続く 5.3 節で彼は計算機を用いた「実験 (Versuch)」に言及している。

例えばモーターの構造や鋳物の正確な剛性計算、振動計算、複雑な航空力学の問題、原子論などといった数多くの領域が、これまで不十分な仕方では計算的に開拓されてこなかった。ここにおいてもこの機械は費用のかかる実験を省略し、これまでに予期し得なかったほどの学術的進展を促す可能性がある⁴⁷。

数値気象予報のような膨大な計算を短期間で実行する必要がある領域に計算機を利用するとなると、電子式素子の導入による演算高速化は必須である。そして次の引用にあるように、この報告書が書かれた 1939-40 年頃にはツーゼが電子式採用の意義を認識していたことがわかる⁴⁸。

工学学士ヘルムート・シュライヤーは、真空管回路による同等の装置の開発に取り組んできた。この仕事は物資の不足のために中断を余儀なくされている。しかし、この仕事の現況によれば、そのような装置は 1 秒間に 10,000 回の処

⁴⁵ “Die Metereorologen[sic] könnten sehr genaue Vorhersagen machen, wenn sie für ihre Rechnungen Monate Zeit hätten, um alle Umstände zu berücksichtigen. Gelingt es, mit der Maschine diese Rechenarbeit auf ein paar Stunden zu konzentrieren, so ist der Weg zur Verbesserung der Wettervorhersage frei.” (Zuse 1940, p. 8)

⁴⁶ フォン・ノイマン主導のもと高等研究所で行われた気象学プロジェクトについては Aspray ([1990]1995, ch. 6) に詳しい。

⁴⁷ “Zahlreiche Gebiete, wie z.B der Motorenbau, die genaue Festigkeitsrechnung bei Gußstücken, Berechnung von Schwingungen, komplizierte aerodynamische Probleme, die Atomtheorie, usw. sind bisher rechnerisch nur in unzulänglicher Weise erschlossen. Auch hier kann die Maschine kostspielige Versuche ersparen und den wissenschaftlichen Fortschritt in bisher ungeahntem Maße fördern.” (Zuse 1940, p. 8)

⁴⁸ 計算機にこうした応用領域があることをツーゼが認識するようになったのが、真空管の導入による演算高速化の可能性を認識した後であったのか、それともその前であったのかは定かではない。

理（加算）が可能であることが確実なものとして予言されている。これは、今日の機械に対して 1,000 倍の速度を意味する。この機械は約 20 の演算をとまなう正弦級数全体を 10 分の 1 秒で計算することが可能である。真空管構造はそれゆえ学問的にも信頼性の観点からいっても最善の構造であることが見込まれる⁴⁹。

いずれにせよ、ツーゼは 1939–40 年頃にはシュライヤーを通じた電子式の考察を通じて、「高速演算機械」としての計算機を考えるに至り、行列式や級数展開のような計算にとどまらない数値解析的な計算への応用を考えるようになっていたことがわかる。

ツーゼは航空機エンジニアとしての経験を買われて 1940 年の半ばには前線勤務から外れ、再度ヘンシェル社にエンジニアとして勤務することとなる⁵⁰。彼はその傍らで 1941 年暮に Z3 を完成させるとともに、この装置の商業化を見越して世界でも初期の計算機メーカーである「ツーゼ工学研究所・装置製造会社 (*Zuse Ingenieurbüro und Apparatebau*)」を設立、翌 1942 年には後継機 Z4 の開発を開始する⁵¹。

この時期に行われたプランカルキュールへと繋がる仕事として重要なのは、それまでに行ってきたリレー回路による演算の理論をまとめ、学位請求論文とすることを念頭に書かれた「命題計算の特別な検討及びそのリレー回路への応用の下における汎用計算理論試論 (Ansätze einer Theorie des allgemeinen Rechnens unter besonderer Berücksichtigung des Aussagenkalküls und dessen Anwendung auf Relaischaltungen.)」(1943 年執筆, 1963 年公表) である⁵²。

⁴⁹ “Herr Dipl. Ing. Helmut Schreyer hat ferner die Entwicklung des gleichen Gerätes mit Röhrenschaltungen in Angriff genommen. Die Arbeiten mußten aufgrund von Materialmangel eingestellt werden; jedoch kann nach dem Stande der Arbeiten mit Sicherheit voraussagt werden, daß solche Geräte in der Lage sind, 10 000 Spiele (Einzeladditionen) in der Sekunde auszuführen. Das bedeutet eine Vertausendfachung der Geschwindigkeit gegenüber heutigen Maschinen. Die Maschine ist in der Lage, die gesamte Sinus-Reihe mit etwa 20 Operationen in einer Zehntelsekunde zu rechnen. Die Röhrenkonstruktion stellt auch wirtschaftlich und in Bezug auf Betriebssicherheit voraussichtlich die beste Konstruktion dar.” (*ibid.* p. 4) ここで真空管構造は「信頼性の観点からも最善」と言及されているが、ツーゼが本当にそのように思っていたかどうかは疑問である。ツーゼが真空管を自らの計算機に導入するのは 1958 年に製造が開始した Z22 以降のことであり、信頼性に確信が持てるまで彼は真空管素子の導入を差し控えた (Petzold 2002)。軍に提出されたこの文書の性格を鑑みれば、これは自らの兵役免除および資金援助を期待しての、ある種の誇大宣伝と見なすべきであるかもしれない。

⁵⁰ Zuse [1984]1993, pp. 57–58.

⁵¹ Zuse [1984]1993, pp. 65, 75.

⁵² この論文は戦中戦後の混乱により結局学位論文として提出されることはなかった。今回参照するにあたっては 1963 年に公表されたタイプスクリプト (ミネソタ大学 Charles Babbage Institute 所蔵) を使用した。

この論文は彼のそれまでの仕事の集大成であり、扱われている内容は多岐に渡る。第1部「汎用計算試論 (Ansätze eines allgemeine Rechenkalküls)」第2部「回路問題への命題計算の応用 (Anwendung des Aussagenkalküls auf Schaltungsprobleme)」の二部構成で、第一部では命題計算を用いた計算理論を展開し、第二部でそれを回路を用いて実装するための工学的な方法を扱っている⁵³。

ツーゼは第1部末尾において固定的計算計画 (starre Rechenplan) と非固定的計算計画 (unstarre Rechenplan) という2分類を導入する。端的に言えば、前者は条件分岐を含まず、後者は条件分岐を含む計算計画を指す。ツーゼの説明によれば「固定的計算計画においては、数と現れる値の結合は常に同じ構造を持ち、データの内容だけがその初期値に応じて変化する、という方式が成り立つ。(中略) 一方で、これとは対照的に入力値が計算の進行に対して影響を及ぼす計算計画がある」⁵⁴。

ツーゼは非固定的な計算計画として、給与所得者の所得控除額の算定、交差の有無が未知の2つの領域の面積の和、全称量子化子、存在量子化子を含む命題の真偽判定などを挙げている。その一つとして所得控除の例を紹介すると、「仮に例えばある給与所得者が毎月300マルクより少ない給料を受け取っているとすると、この人は健康保険料の支払い義務を負わない。控除額算定の計算計画は給与額によって別々に進む」⁵⁵。ツーゼは基本的に非固定的計算計画は固定的計算計画に帰することができるとしつつも、そのようなやり方は不経済 (unwirtschaftlich) であると述べている。このような不経済の例として挙げられているのが、Zuse (1944b) においても言及される、成分の多くが0であるような疎行列を解く計算計画である⁵⁶。

以上述べたことを整理すると、ツーゼは真空管の導入による演算高速化の検討を通

⁵³ 目次の項目を見ると、第1部はA, B, Cの3つの章に分かれている。A章は概論で計算概念の定義 (A-1節)、データ概念の説明 (A-2節) を行っている。B章は「データ間の形式的諸関係」と題されており、ヒルベルト、アッカーマン、ベルナイスらによる数学基礎論の議論を参照しながら、これを計算機へ応用するための議論を展開している。これらについて本稿では取り上げず、条件分岐の問題を取り扱っているC章を紹介するに留める。第2部は工学的にテクニカルな議論が主となるためここでは立ち入らない。

⁵⁴ “Bei ihnen ist die Art, die Zahl und die Verknüpfung der auftretenden Werte stets von gleicher Struktur, und nur der Inhalt der Angaben ist entsprechend den verschiedenen Ausgangswerten verschieden. (...) Im Gegensatz hierzu stehen solche Rechenpläne, bei denen die Ausgangswerte einen Einfluß auf den Ablauf der Rechnungen haben.” (Zuse 1943, p. 58)

⁵⁵ “Empfängt z.B. ein Gehaltsempfänger weniger als DM 300,— monatlich Gehalt, so ist er nicht verpflichtet, Krankenkassenbeiträge zu zahlen. Der Rechenplan für die Berechnung der Abzüge verläuft also nach der Höhe des Gehaltes verschieden.” (*ibid.*)

⁵⁶ *ibid.* p. 59.

じて数値解析的な領域へも計算機の応用を考えるようになり、一方では遅くとも 1943 年時点で、開発当初には検討していなかった条件分岐にも到達し、より柔軟な論理的処理への応用を考えるようになっていた。前者は主として演算速度の問題であり使用する素子を電子式に変更すればある程度対応が可能である。しかし後者の論理的な処理においては条件分岐の導入が必要であり、ツーズがそれまでに製作してきたハードウェアでは対応ができなかった。

このように、Z シリーズ計算機が想定する処理と、ツーズが計算機によって実行することを望む処理の間には、条件分岐を含む論理的な処理への対応という点で隔たりが生じていた。この隔たりの存在をツーズも認識しており、これ以降これを埋めるべくいくつかの方策が取られる。その方策が計算計画生成装置 (Planfertigungsgerät) の開発構想と穿孔フィルム読み取り機構の追加である。

3.4 隔たりを埋める試み

第二次大戦の激化に伴って、ツーズのハードウェア製作はますます困難なものとなり、さらに 1945 年の敗戦以降は 1948 年頃まで、完全な中断を強いられることになる。そのためこの時期の仕事は理論方面やソフトウェア方面に完全に偏ったものになっている。戦争末期の 1944 年、ツーズはそれまでの数値計算機械に代わる論理演算機械⁵⁷の特許を申請するとともに、計算計画生成装置の開発構想を行う。穿孔フィルムによって命令を読み込む場合、フィルムに書き込まれた命令を逐次的に処理することしか出来ないため、条件分岐の実装は難しい⁵⁸。そして計算ではなく先に紹介した税額の計算のような処理を想定していたのであれば、条件分岐を行うための機構の導入は避けられないように思われる。ツーズがこの隔たりを埋めるために取ったのは、計算計画を穿孔フィルムで外部から供給する方式を維持したまま、穿孔フィルムの読み取り機構を複数に増やし、条件判定によって読み取るフィルムを変更するという対応であった⁵⁹。

⁵⁷ ツーズはのちにこの機械をパベッジ-ブール機械と呼び、これには電子式の採用を検討していたと言及している (Zuse [1984]1993, pp. 85-86)。

⁵⁸ 1944 年の特許申請書 (Zuse 1944a) にも計算計画は穿孔フィルムで供給すると書かれており (p. 12)、また本申請書には条件分岐への言及も見当たらない。

⁵⁹ この穿孔フィルム読み取り機構の追加については 1944 年の特許申請書にも言及がなく、考案された時期は定かではない。ハードウェア製作を再開して初めての仕事となった Z4 の修繕・改良時 (1949-50 年) にこの機構を導入 (Speiser 2002, p. 269) していることから、発案は 1945-48 年頃と推定される。

同 1944 年に、ツーゼは計算計画生成装置 (Planfertigungsgerät) という穿孔フィルム生成装置を製作することも検討している。この装置は数式を入力すると入力した処理を実行する穿孔フィルムを吐き出すというものであったが、戦後のハードウェア開発再開後も完成することはなかった⁶⁰。しかしこの装置について述べた文書 (Zuse 1944b) は工学的な実現の方法に関する記述こそ少ないものの、興味深い論点をいくつか含んでいる。

彼によれば「計算計画生成装置の課題は代数的計算装置 (V4)⁶¹ のために計算計画の生成を本質的に容易にすることである。この装置は論理的計算装置への過渡的段階を表現している」⁶²。ここで言う代数的計算装置とは Z4 のような固定的計算計画にのみ対応した計算装置のことであり、論理的な計算装置とは条件分岐が可能な計算装置のことと考えられる。ツーゼはこの計算計画生成装置によって、条件分岐が果たす機能の一部 (特に、計算量の低減) を肩代わりすることを目指していた。ツーゼによれば、この装置は次の 3 つの階層 (Stufe) に分かれる。

第一層 キーボードを通じて、一般的な数学的で書かれた式を入力

第二層 一般的構造の計算計画から特殊構造の計算計画を導出 (計算計画の圧縮)

第三層 部分計画と下位計画から計算計画を構成 (組み立て手続き)⁶³

第二層において、ここでも念頭に置かれているのは行列の計算である。彼は実践の現場で現れる行列は一部分だけが埋まった形で組み立てられている (つまり対角成分とその近辺を除く多くの成分が 0 である) と述べた上で、計算を効率よく行うために不要な計算を避けることの重要性を指摘する。「計算計画の圧縮」とは、全ての成分を考慮に入れて計算を行う一般的で無駄の多い計算計画から、計算の不要な部分を取り除いた特殊で無駄のない計算計画を導き出すことを意味している⁶⁴。計算機が条件分岐に対応していれば、非固定的計算計画を用いることでこうした計算は回避すること

⁶⁰ Ceruzzi 1998, pp. 83–84.

⁶¹ Z4 のことを指す。注 7 を参照。

⁶² “Aufgabe der Planfertigungsgeräte ist es, die Herstellung der Rechenpläne für das algebraische Rechenggeräte (V4) wesentlich zu erleichtern. Diese Geräte stellen ein Übergangsstadium zu den logistischen Rechenggeräten dar (...)” (Zuse 1944b, p. 1)

⁶³ “I. Eintastung einer Formel an einer Tastatur in der üblichen mathematischen Schreibweise. II. Ableitung von Rechenplänen spezieller Struktur aus Rechenplänen allgemeiner Struktur (Einschmelzen von Rechenplänen). III. Zusammensetzung von Rechenplänen aus Teilplänen und Unterplänen (Montageverfahren)”. (*ibid.*)

⁶⁴ Zuse 1944b, pp. 3–5.

が出来るが、これと同様の機能をこの計算計画生成装置に担わせようとしていたことになる。第三層は頻繁に使用される計算計画を下位計画として貯蔵しておき、ある問題がその下位計画を要求したときには、計算計画中の適切な場所にその下位計画を組み込むことが出来るような仕組みになっていた。そうすることで、計算計画を記述した穿孔フィルムの生成を容易にするのが第三層の目標とされた⁶⁵。

要約すれば、ツーゼは計算計画生成装置によって、計算量が少なくなるよう効率的に生成された計算計画が記述された穿孔フィルムを、複数のフィルム読み込み機構を備えた Z シリーズ計算機（ここで念頭に置かれているのは Z4）に読み込ませるという手法により、条件分岐を含む計算計画への対応および処理の効率化に対応しようと試みたということになる。

しかし、プランカルキュールにおいては「分岐用に複数の穿孔フィルムを用意する」という素朴な方法ではとても対応しきれない計算計画も記述することができる。第 2 節で言及した何重にも繰り返しや条件分岐が入れ子になった計算計画を、穿孔フィルムを何本も読み込んで実装するというのは無理がある。つまり、この時期にツーゼが提出した方法では、ハードウェアとソフトウェアの間に生じた隔たりを（縮めることは出来ても）埋めることはできていない。

ツーゼはのちに Z4 開発時を振り返って「私は自分の仕事を固定的なプログラムに従って数値計算を解くための機械の製作に制限しなければならなかった。これには大きな忍耐を必要とした。なぜなら、理論的な研究によってこの機械の応用範囲を拡張する誘惑に駆られたからである。プログラムは数字のように一連のビット列によって表現できるのだから、プログラムも貯蔵部に貯蔵できるように思われた。これは今日で言う条件分岐やアドレス変換を可能とすることを意味した」⁶⁶と回想している。この回想が正しければ、ツーゼは隔たりの存在を認識しつつ、実装を一旦棚上げにしてプランカルキュールを構築したということになる。

§4 結論

これまで、ツーゼのハードウェアにおける開発活動とソフトウェアに関する理論的な仕事の展開を辿ってきたが、Z シリーズ計算機とプランカルキュールの間にはどの

⁶⁵ Zuse 1944b, pp. 5–6.

⁶⁶ Zuse 1984, p. 77. 「固定的なプログラム」と訳した部分は原著でも “starren Programm” となっている。

ような関係があったのだろうか。

プランカルキュールは Z シリーズ計算機開発時の理論的考察の過程で生まれたものであり、その基本的な用語や概念（例えば“Rechenplan”や“Angabe”など）において、プランカルキュールはツーゼの計算機開発活動から明らかに影響を受けている。一方プランカルキュールの開発へと繋がる理論的な考察、特に条件分岐の検討が彼をして計算計画生成装置や穿孔フィルム読み取り機構の追加といった方策を取るよう促したのであるから、両者は相互に影響を与えあっていると考えるのが自然である。つまり、確かに Z シリーズ計算機とプランカルキュールの間には実装能力の観点から言えば隔たりがあるものの、前者が後者の開発における概念的な基盤を与え、後者に繋がる仕事が前者に開発の指針を与える、という相互関係があったと言う事ができるだろう。

Z シリーズ計算機とプランカルキュールの間に隔たりが生じた主要な理由として、ツーゼの活動が第二次大戦期のドイツで行われたことが考えられる。1939 年 9 月以降、彼のハードウェア開発活動は徴兵や徴用、および開発の拠点であったベルリンへの空襲などにより停滞を余儀なくされ、1945 年 5 月の敗戦から数年間は完全に中断した。これによりソフトウェアに関する仕事とハードウェア製作活動とで進展に大きな差が生じ、その結果 1943-44 年頃には、条件分岐を要求するソフトウェアによって条件分岐に対応できないハードウェアが置いて行かれる形になっていた。

しかし、ツーゼが 1930 年代の末から 40 年代の半ばにかけて思い描いた計算機の応用は、こうした背景ゆえにハードウェア開発を棚上げにして行われたものであったとしても、その多くがのちのコンピュータ利用の展開を预言するものであった。今や財務計算はプログラム制御式計算機なしに行われることはなく、数値解析は多くの研究分野で基礎的な研究の手法となり、チェスを指すソフトウェアは当たり前のものとなった。ツーゼは計算を「与えられたデータから、何らかの規則に従って、新しいデータを得ること」と述べた。こうした考え方は用途を計算に限る「計算機」というより、むしろ汎用情報処理装置としての「コンピュータ」の行う処理に近いのではないだろうか。このような観点から言えば、ツーゼは確かに「コンピュータ」開発の先駆者であったと言える。

参考文献

- Aspray, William. [1990] 1995 年. 『ノイマンとコンピュータの起源』杉山滋郎・吉田晴代訳. 東京: 産業図書. [原書: *John von Neumann and the origins of modern computing* (MIT Press)].
- Bauer, Friedrich L. 1972. The Plankalkül of Konrad Zuse: a forerunner of today's programming languages. *Communications of the ACM* 15.7: 678–685.
- . 1980. Between Zuse and Rutishauser — the early development of digital computing in Central Europe. In *A history of computing in the twentieth century*, eds. Metropolis, Nicholas. Howlett, Jack. and Rota, Gian-Carlo, pp. 505–524. New York: Academic Press.
- . 2002. The Plankalkül of Konrad Zuse — revisited. In *The first computers: history and architectures*, eds. Rojas, Raúl and Hashagen, Ulf, pp. 277–293. Cambridge, Massachusetts: MIT press.
- Campbell-Kelly, Martin. Aspray, William. Ensmenger, Nathan. and Yost, Jeffrey R. 2014. *Computer, a history of information machine*. Colorado, Boulder: Westview Press.
- Ceruzzi, Paul E. 1981. The early computers of Konrad Zuse, 1935–1945. *Annals of the History of Computing, IEEE* 3: 241–262.
- . 1998. *A history of modern computing*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Church, Alonzo. 1965. Review: Hansi Piesch, Archiv fur Elektrotechnik. *Journal of Symbolic Logic* 30: 247–248.
- Giloi, Wolfgang K. 1997. Konrad Zuse's Plankalkül: the first high-level, “non von Neumann” programming language. *Annals of the History of Computing, IEEE* 19.2: 17–24.
- Knuth, Donald E. and Pardo, Luis Trabb. 1980. The early development of programming languages. In *A history of computing in the twentieth century*, eds. Metropolis, Nicholas. Howlett, Jack. and Rota, Gian-Carlo, pp. 197–273. New York: Academic Press.
- Lyndon, Roger C. 1947. The Zuse computer. *Mathematical Tables and Other Aids to Computation* pp. 354–359.

- Nebeker, Frederik. 1995. *Calculating the weather: meteorology in the 20th century*. San Diego: Academic Press.
- Petzold, Hartmut. 2002. Konrad Zuse and industrial manufacturing of electronic computers in Germany. In *The first computers: history and architectures*, eds. Rojas, Raúl and Hashagen, Ulf, pp. 315–322. Cambridge, Massachusetts: MIT press.
- Randell, Brian. 1982. Zuse and Schreyer. In *The origins of digital computers*, eds. Randell, Brian, pp. 159–181. Berlin: Springer-Verlag.
- Rojas, Raúl. 1998. How to make Zuse's Z3 a universal computer. *Annals of the History of Computing*, IEEE 20: 51–54.
- . 2002. The architecture of Konrad Zuse's early computing machines. In *The first computers: history and architectures*, eds. Rojas, Raúl and Hashagen, Ulf, pp. 237–261. Cambridge, Massachusetts: MIT press.
- Speiser, Ambros P. 2002. Konrad Zuse's Z4: architecture, programming, and modifications at the ETH Zurich. In *The first computers: history and architectures*, eds. Rojas, Raúl and Hashagen, Ulf, pp. 263–276. Cambridge, Massachusetts: MIT press.
- Zemanek, Heinz. 1991. Geschichte der Schaltalgebra. In *Informatik und Mathematik*, eds. Broy, Manfred, pp. 43–72. Berlin: Springer-Verlag.
- Zuse, Konrad. 1936. Verfahren zur Selbsttätigen Durchführung von Rechnungen mit Hilfe von Rechenmaschinen. [patent application, <http://zuse.zib.de/collection/4QsqpVNXtamyaoi/item/rv70uXzABKILtuc>].
- . 1938. Einführung in die allgemeine Dyadik. [<http://zuse.zib.de/collection/4QsqpVNXtamyaoi/item/kU9001JLS2kB44d>].
- . 1940. Rechenmaschine. [<http://zuse.zib.de/collection/4QsqpVNXtamyaoi/item/7Ix8YJt0EEjtaTe>].
- . 1943. Ansätze einer Theorie des allgemeinen Rechnens unter besonderer Berücksichtigung des Aussagenkalküls und dessen Anwendung auf Relaischaltungen. [unpublished typescript].
- . 1944a. Anmeldung Z394. [patent application, <http://zuse.zib.de/collection/1rUAFKDirW8o3gT/item/xOHhAcJcc6cra0d>].
- . 1944b. Planfertigungsgeräte. [<http://zuse.zib.de/collection/1rUAFKDirW8o3gT/item/fwr072wuiYWRsQ06>].

- . 1945. Der Plankalkül. [http://zuse.zib.de/collection/1rUAFKDirW8o3gT/item/DB2j_t_w1fbxvaiq].
- . 1949. Über den allgemeinen Plankalkül als Mittel zur Formulierung schematisch-kombinativer Aufgaben. *Archiv der Mathematik* 1: 441–449.
- . 1959. Über den Plankalkül. *it—Informationstechnik* 1: 68–71.
- . 1980. Some remarks on the history of computing in Germany. In *A history of computing in the twentieth century*, eds. Metropolis, Nicholas. Howlett, Jack. and Rota, Gian-Carlo, pp. 611–627. New York: Academic Press.
- . [1936] 1982. Method for automatic execution of calculations with the aid of computers. In *The origins of digital computers*, eds. Randell, Brian, translated by R. Basu, pp. 163–170. Berlin: Springer-Verlag. [原書: Verfahren zur Selbsttätigen Durchführung von Rechnungen mit Hilfe von Rechenmaschinen].
- . 1984. *Der Computer—Mein Lebenswerk*. Berlin: Springer-Verlag.
- . [1984] 1993. *The computer—my life*. translated by Patricia McKenna and J. Andrew Ross. Berlin: Springer-Verlag. [原書: *Der Computer—Mein Lebenswerk* (Springer-Verlag)].
- 星野力. 1995 年. 『誰がどうやってコンピュータを創ったのか』東京: 共立出版.