

## 富岳に思う (2020/07/01)

この頃、コンピュータ用語が普及したと思います。「リセット」や「フラグ」「バグ」はもう日常会話で使われているし、さらに「リローデッド」とか「ブート」となるとそこまで言うか？という感じ。やはりテレビゲームに始まって、パソコンやスマホの普及が違和感なく受け入れられる環境を作ったんでしょう。子供も大人も、「あっ、リセットしなきゃ」なんて普通に言いますからね。さらには本来の意味を拡張して、人生のやりなおしたいな意味でもリセットやブートが使われているようです。

そういう意味では、「スパコン」もずいぶんと普及したものだと思います。おそらくは、2009年の事業仕分けで運輸議員が発言した「2位じゃダメなんですか？」が話題になったお陰でしょう。今般、6/23日本のスパコン「富岳」が世界ランキングでトップを獲得したと

いう報道も、例えばオリンピックで日本が金メダルを取りました、とほぼ同様の感覚で受け入れられたように思います。そもそもスパコンって何だっけ？とか、それ役にたつの？みたいなコメントは新聞やTVの報道ではほとんど見当たりませんでした。むしろ運輸議員の言葉を振り返り、その真意や影響、京の成果、富岳に至るその後の経緯を知るにはよい機会だったのではないのでしょうか。

スパコンもスーパーなコンピュータなので、言ってみればコンピュータには違いありません。コンピュータの性能を高める方法はいろいろありますが、報道を見る限り富岳で用いられた技術はとてもベーシックなところをきちんと押さえているのだな、と感じました。よく言われる例えですが、コンピュータの処理(例えば1つの計算をする、というような)は工場の生産ラインに似ています。ベルトコンベアの脇に組立をする人が並んでいて、端から入ってきた半完成品に少しずつ部品を追加して最後に完成させるというやつです。コンピュータが1つの計算をするのも、同様に端から数字が入ってきて少しずつ計算して最後に結果を出すイメージです。

この時、生産ラインの性能に関係するのが1日に何個の製品を生産できるか(言い換えれば、平均的に1個の製品をどれだけの時間で完成できるか)と、一日の最初や製品を変えたときに最初の完成品が出てくるまでの時間です。前者をスループット、後者をレイテンシと言います。例えば10人の作業者が一人あたり30秒かけて作業するとすると、スループットは30秒に1個、レイテンシは300秒になります。

スループットの性能を高くすることは、生産ラインで最も時間のかかる作業を短くする

ことです。時間のかかる仕事は二人に分けられれば、上記の例だと 30 秒を 15 秒にすることでスループットは2倍になります。しかしレイテンシはそうはいきません。一人が 15 秒になっても作業が二人分になっていれば 30 秒かかるのは同じだからです。作業全体の時間がレイテンシになります。レイテンシは同じ製品をどんどん生産している間は気になりませんが、トラブル等で作りかけた製品を全部作り直ししたり、違う製品に生産ラインを切り替えるときに影響が出てきます。

これはコンピュータでいえば使いよさに直結します。昔のベクトル型と言われたコンピュータは、長いベクトル(数字の並び)をひたすらに計算させた性能を競いました。同じ処理を多くの数字へ施すので、上記例では同じ製品を作り続ける生産ラインと同じです。スループットが性能を左右するので、作業者を増やして一人あたりの作業時間を短縮します。しかしながら、コンピュータの用途はそのような都合のよい条件だけではありません。むしろ長いベクトルを用いるのは例外的で、ほとんどの用途は同じデータへいろいろな処理を施しています。作業ラインで言うと製品を 1 個作ったら別の製品へ切替えるようなもので、レイテンシがとても重要になります。レイテンシが大きいコンピュータは、特別な処理以外では思ったほど性能の出ない扱いづらいものになります。

レイテンシを短くするには、作業全体の時間を短縮するしかありません。これは簡単ではありませんが、生産ラインで言えば無駄な作業をできるだけなくしたり、それぞれの作業を早く終わらせて時間を短縮する作業になります。同時に複数の作業を行って、後で 1 つにまとめるのも効果があります。富岳ではこうした無駄な作業の短縮(CPU とメモリの接近、ブロック間の SW 接続、CPU 間の Tofu 接続)や複数作業の同時進行(1 チップ 52CPU コア、1 筐体 384CPU、396 筐体)に加え、処理に応じて無駄な作業を行わない工夫(可変ベクトル、6 ビット浮動小数点演算、8 ビット整数演算)が用いられているようです。

これらの技術は最新トレンドではありますが、最近では高性能コンピュータや GPU においてベーシックな技術となりつつあります。冒頭に書いたように、富岳ではそれら最新技術をきちんと押さえる(使いこなして性能を引き出す)ことで総合的でリアルな性能を達成し、今回のトップ獲得につながったのだと推察します。関係者のご尽力に対して、心よりお祝いと敬意を送りたいと思います。

## リンゴの変身 (2020/07/07)

コンピュータ用語が日常生活に浸透するのとは逆に、異なる分野の用語がコンピュータ分野に入って来ることもあります。というか、コンピュータの歴史に比べれば人類の営みははるかに長く、かつ多くの人がかかわっているのです。その流れは自然でしょう。スマホやパソコンでアプリを使うとき設定を必要に応じて変更しますが、何もしない元の設定が「デフォルト」です。これなど、コンピュータ関係者は何気なく話していますが、金融関係者にとっては忌むべき用語「債務不履行」なんですね。つまり借金を返せなくなった/返してもらえない状況。一番怖いと思ったのは、処理を実行する「エグゼキュート」。業務の遂行、執行の意味ですが、死刑執行にも使われます。

そんな言葉の1つで、コンピュータでは有名な言葉が「アーキテクチャ」です。直訳すれば「建築様式」。Wikiによれば、もともと建築物の構造や工法まで広い範囲をカバーする用語のようで、それが設計思想という趣旨も含むようになってきたとのこと。コンピュータの世界では、1964年にIBMが発表した「System/360」で初めて用いられたそうです。System/360でのアーキテクチャとは、プログラマ(\*1)から見たコンピュータの定義とされました。これが同じということは、同じアプリ(\*2)が手直し無しで動くということになります。安くて性能が低い製品でも、高くて高性能な製品でも、給料の計算に使うコンピュータでも、難しい方程式を解くコンピュータでも、同じアプリが動くようにしたのが画期的だったのです。

\*1:アプリを作る人

\*2:パソコンやスマホのアプリとほぼ同義。プログラム、ソフトウェアともいう

System/360はアーキテクチャという概念を取り入れて、1つのアーキテクチャを持つ様々な製品ラインナップを用意しました。つまりいろいろな価格・性能のコンピュータで同じアプリが動くのです(当然安い機種では遅く、高い機種では速い)。今では同じWindows10のパソコンなら、メーカーや価格、性能が違っていても同じアプリが動いて当たり前ですが、当時はSystem/360までこの「互換性」という発想がなかったのです。だからコンピュータを変えたらアプリを作り直していたのを、System/360なら安い機械を導入しておいて、仕事が増えてきたら高性能な機械に買い替えても作ったアプリはそのまま使えることになりました。IBMから見ればお客様にまずは導入していただき、じっくりと大きく育てる商売ができました。これでIBMは大成功し、一躍世界でトップのコンピュータメーカーになりました。

以後、コンピュータの進歩でマイコンが登場したり、パソコンが普及したり、今はクラウドも使っていますが、このアーキテクチャが重要であることは何も変わっていません。多くのコンピュータが市場に現れ、競争し、負けたものは消えてゆく中で、アーキテクチャをないがしろにした製品が市場から退場せざるを得なくなった事例は枚挙にいとまがないのです。それは言い換えると、ユーザを無視したしっぺ返しです。メーカーの立場からは、アーキテクチャを変えたら性能・機能が上がるので互換性が無いのを我慢してくださいと言いたくなりますが、ユーザー(\*3)の立場から見たらメーカーのエゴそのものでありそっぽをむかれます。結果、コンピュータ関係者にとって「アーキテクチャの変更」とそれに伴う「互換性の喪失」は最大のタブーとなっています。もちろん、互換性を維持したつもりだったけどユーザに満足してもらえなかった、というトホホな事例も多々あります。

\*3:コンピュータの利用者。アプリを作るよりも利用することに重点のある人たち

時は現代、さる 6/22 にアップルは開発者会議「WWDC20」でパソコン「Mac」の CPU を「Apple Silicon」なる自社設計のコンピュータに変えると発表したそうです。業界では噂があったのですが、これにはやはり驚きました。なぜならば、アーキテクチャを Intel 社のものから ARM 社へ全面変更することになるからです。実はアップルがアーキテクチャを大幅変更するのはこれが 3 度目で、まさに業界のタブーを既に 2 度成し遂げているのです。自分が知る限り、Mac のような大量生産され一般ユーザが利用するコンピュータで、全面的なアーキテクチャ変更を(1 度ならず 2 度までも)成功させた事例は皆無と思います。1 人のユーザだけがそのコンピュータを利用しアプリを作っているならば自分でアプリを作り直せば何とかできます。Mac のような製品はユーザ数もアプリ数も桁違いに多いし規模も大きいので想定外の出来事もあり得ますし、そもそもユーザがそっぽを向いてしまうリスクもあります。

移行に対してさすがにアップルは手慣れた印象で、主なアプリの移植ができる道具立てを用意し、今のアーキテクチャのソフトがそのまま動く仕組みを提示し、そしてさらに「ご褒美」として iPhone/iPad との連携を示唆しています。技術的には、二番目のそのまま今のアプリが動く仕組みが難所です。なぜならば、今回の場合 ARM 社のアーキテクチャのコンピュータが Intel 社のアーキテクチャのコンピュータを真似して動いても、当然ながら元のコンピュータの性能を出すのは難しく、最悪の場合は正常に動作しないことがあり得るからです。ここはさすがのアップルも先の 2 回の移行で苦労しているところですが、3 度めはエレガントに行くかどうか。

一方で最後の iPhone/iPad 連携は、恐れ入りました(\*4)。これに関してはいろいろな記事で期待感が盛り上がっていますが、非常に分かりやすく強力なアピールだと思います。

iPhone/iPad のアプリや機能を使えるだけでなく、電力も小さくなるとのこと。さすがはアップルで、違う見方をするとアップルが iPhone をやっていなければ今回のアーキテクチャ移行はやらないかもしれません(\*5)。上述の通りアーキテクチャ変更の失敗は数知れませんが、おそらくこのようなメリットを提示できた事例はこれまで無いでしょう(\*6)。違う見方をすると、もうパソコンというコンピュータは単独ではなく、スマホやクラウドまで含めたコンピュータ「群」の1つになるということかもしれませんね。このような戦略を掲げつつ、自らの利益のみならずユーザにクリアなメリットを提示できるアップルの強力なビジネスモデルに脱帽です。

\*4:パソコン(コンピュータ)がスマホ(携帯電話・携帯端末)に合わせる、という観点も隔世の感です

\*5:もちろん他に多くのメリットがありますが、リスクもまたかなり大きいので

\*6:おそらく携帯端末のアプリをパソコンで走らせたというニーズもなかったでしょう(逆が一般的)

## 電気羊の夢 (2020/07/14)

テクノロジーというのは、自然界の働きを人間の視点でより都合よく、効率的にしたものだと言えると思います。鳥に対する飛行機、馬に対する自動車は分かりやすい事例。治水では自然堤防をより大規模に、自分の都合のよいところに作ったのが人工の堤防でしょう。天然の川に汚水を流して自然に浄化される仕組みを、人工の流路で大規模に浄化しているのが下水道。雷が作る電気を連続的に一定の強さで作るのが発電所。薬草の成分を人工的に合成して大量に作っているのが医薬品。動物の排泄物に代わって植物の育成に有用な成分を合成したのが肥料。

近年、その名称が普通に使われるようになった「AI」もまさにそれです。AIとは人工知能(artificial intelligence)の略語で、人工的に人の知性を作るもの。ヒトの知性をコンピュータで実現させる、という試みはコンピュータの黎明期からあるようです。人間の能力をはるかに超える計算能力を目の当たりにすると、コンピュータを使って上手くやれば会話とか翻訳とか「知的」なこともできるはず、という期待がわいてきます。その気持ちは、フィクションも含めて多くの人を虜にしてきました。しかしながら現実は甘くなく、それらしい働きはできても所詮はとて人間には及ばず壁にぶつかります。そしてまた再挑戦が始まる。その結果、これまで2度の大きな期待と失望の山・谷がありました。そこから、今のAIは3つ目の山として「第三次 AI ブーム」とも言われています。

第三次 AI ブームがこれまでに2回と異なるのは、ある面で人間の能力を凌ぎ実用的な利用ができるようになったことです。2015年10月、「アルファ碁」が人間のプロ棋士を破ったのは画期的でした。スマートフォンやスマートスピーカーで、音声を使った問い合わせや操作を行うことは当たり前になりました。多くのカメラで人の動きを捉えて自動的に精算を済ませてしまい、店員が1人もいない店舗も実現されています。人間が運転しない自動車も、実用化に向けて開発が進められています。AIを使って何かをする、できた、改善するという報道はほぼ毎日のように新聞や雑誌の紙面を賑やかさせていて、応用範囲はますます広がる一方に見えます。

この能力を実現したのは、脳の神経細胞「ニューロン」の動きを参考にしたニューラルネットワークと呼ばれる仕組みです。ニューラルネットワークでは非常に多くのニューロンが1つ1つは単純な同じ動作を同時に行いながら、互いにつながって結果を出す原理を利用しています。この「同じ単純な動き」を「同時に」「多数」動かすところがポイントです。先に書いた工場の生産ラインのような仕事がコンピュータは得意で、少しずつ異なる作業を順番に行うこと(\*1)に必要な結果を出します。しかしニューラルネットワークは、何百も

何千もいる作業者がまったく同じ作業を同時に行い、全体を1つにまとめてみれば結果が出ているという仕組みなのです。

\*1:これを同時並行に行う仕組みもあるが、複数チームのプロジェクトと同様に効率を上げるのは簡単ではない

このことが、ニューラルネットワークに必要となるコンピュータの仕組みに違いをもたらします。いろいろな作業を行える仕組みよりも、比較的単純な作業を同時に多数動作させる仕組みが不可欠です。言ってみればニューラルネットワークは椀子そばのようなもの(\*2)で、1杯のそばを食べるのは簡単ですが、短時間に多くのそばを食べるにはタイムリーにそばをお替りできなければなりません。しかも、1人ではなく何百、何千人が同時に椀子そばを食べて世界記録に挑んでいるようなものなのです。

\*2:食べる速度だけでなくレイテンシとスループットが非常に重要。食べる人がそばを待っていてはいけない

世界記録ということでは、さる6/23にスパコン富岳とならんで日本のニューラルネットワーク処理に特化したスーパーコンピュータ MN-3 が世界ランキングトップを獲得しました。これは高性能な動作に必要な電力が少なく、同じ電力で最も高性能が発揮できることが評価されたものです。すなわち椀子そばを同時に多くの人が乱れなく粛々と食べ続け、そこに途切れることなくそばのお替りを供給し続け、なおかつ皆が無駄な労力を使わずちっとも疲れないということ。実用には課題も残る(\*3)と説明されていますが、こうした先端的な応用分野でも世界のトップを走る関係者の皆様にエールを送りたいと思います。

\*3:中身を熟知しない人でも利用できるしくみ(ソフト)が必要と言われている

## たかがデジタル、されどデジタル (1) (2020/07/21)

1970年代に登場したデジタル腕時計は、10万円以上の舶来「高級品」でした。表示に赤く8の字を光らせるLEDを使っていて、時間を見るときだけボタンを押して見るもので、きっと電池もすぐになくなったでしょう。当時、通っていた学習塾の先生がそれを購入したので、たっぷり自慢されたのが懐かしい思い出です。それから、1980年代になるとLCDで白黒の文字が常に表示されるようになり、あつというまに価格が下がりました。それまで腕時計というと一生に何度も買うものではなく、買ったら大事に何年も何十年も使うのが当たり前と思っていましたが、デジタル腕時計ならお小遣いで買えるよね、壊れたら使い捨てでもいいかというレベルになりました。同時にアナログ腕時計もクォーツが当たり前になったことで、時間の精度という点では実用上デジタルとほぼ同じ、精巧な機械機構がいらなくなったのでデジタルと同様にとっても安くなりました(もちろんブランドの高級品は残りましたが)。

そして勃発したのが、アナログ v.s. デジタル論争です。いわゆる文字盤があつて2ないし3つの針がぐるぐる回る「アナログ時計」と、数字が何桁か並んでいるだけの「デジタル時計」のどちらがよいか？ 好きか？ 便利か？ という論争です。一般に実用第一の方にはデジタル、やっぱり時計は装飾品としての価値もあるよねという方にはアナログという論調が多かったと記憶します。デジタルならストップウォッチやカレンダーも付いているから便利という意見や、安物を付けていると品格が疑われるからやめた方がいいという意見などなどあったと思います。その流れで、そもアナログとは時計の針のように連続的に変わるもの(量)、デジタルとは数字のように飛び飛びに変わるもの(量)という解説や解釈が普及しました。当時、1980年代は時計を通じてアナログ、デジタルという言葉を知った人は圧倒的に多かったと思います。

実はアナログの定義としてよく言われる「連続的に変化する量」というのは特徴の1つであつて、本質的なのは同時に説明されていることもある「類似、相似、比喩」だと思っています。つまり何か本物のXがあつて、Xではないがそれに近いもの、同じように変化するもの、特徴をとらえているもの、それがXのアナログだと。時計の場合は目に見えない時間という概念ですが、おそらく太古の昔から人は太陽や月の位置で時間を感じて来たでしょうから、まさに太陽や月が空を動く類似が時計の針の運動ではないでしょうか。

ではデジタルは何か？ 飛び飛びの(離散的な)値にして表現することと定義されることが多いですが、実はこれが本質ではないと思います。デジタルの本質はまさにアナログの正反対、本物のXと似ても似つかないものなのです。デジタル時計は数字で時間を表現して

いますが、1とか2という数字は太陽や月が空を動く運動には何の関係もありません。1とか2という数字自体は学校で勉強したので知っていますが、時間という感覚にするにはアナログ時計を思い浮かべる方も少なくないでしょう(私も未だにそうです)。

そうなんです、数字は時間だけではなく算数で勉強したバナナや柿の数にも使うし、バナナや柿を買う時の値段にも、体重や血圧にも、テストの成績にも自動車の登録ナンバーにも使います。デジタル時計は、同じ数字の並びをある時は時間、ある時は日付にして使えます。つまり本物のXは何でもよくて、この数字はXのこういう性格を表していると決めれば何にでも使えるのです。そして数字という0~9の文字でさえも、計算に使いやすいように並び方や種類が決められているだけで、ローマ数字や他の記号を使っても本質は何もかわりません。利用者が見て意味がわかるのなら、デジタル時計の表示を不思議な誰も見たことのない記号にしても差支えはないのです。

まとめると、デジタルというのは本物Xとは何の関係もない記号(その1つの例が数字)のことです。記号なので、別の記号と区別が必要ですから必然的に飛び飛びになります。その記号に時間という意味をつけようが、日付だろうが、数字以外の例えばアルファベットであっても漢字でも対応さえしっかり定義されていれば何ら問題ありません。アナログであれば本物Xに似ている必要がありますが、デジタルは単なる「決め」だけであり、元より似せようなどと全く思っていないので対応は自由です。まさに数字がそうであるように、同じ記号を定義を変えることで(定義さえできれば)何にでも使えます。実のところ、デジタルという技術の凄みはここにあります。今話題のデジタルトランスフォーメーション(DX)の威力も、つまるところはここに起因しています。

で、このデジタルが記号の定義次第で何にでもなる、という特徴がコンピュータを生み出した。これはまた次回。

## たかがデジタル、されどデジタル (2) (2020/07/29)

1970年代から80年代は、デジタル腕時計とならんで電子卓上計算機(電卓)が商品化され、爆発的に普及した時代でもありました。最初は小数点やマイナスの数字も入力できないものですが、計算を機械にやってもらうという行為がとても刺激的だったのを憶えています。それまで家庭ではそろばんが「計算機」でしたけれど、そろばんは独特の技術が必要で誰でもが使いこなせるものではありません。それに比べて「電卓」は、計算したい式のままだに数字と四則演算を押して、最後にイコールを押すと結果が数字で現れるのですから画期的でした。

その後、電卓はどんどん高性能で小さく、軽く、電池も長持ちになりました。簡単な四則演算だけでなくルートやメモリも加わり、さらには関数電卓という名称で三角関数や対数、指数関数など高度な関数にも対応。ついにはプログラム電卓として、計算手順を予め入れておくことができる高級機種も現れました。こうなると、プログラム電卓と「コンピュータ」の本質的な違いがよく分からなくなります。まだパソコンもない時代に、今から思えばとても原始的な(機能は高級電卓の足元にも及ばない)ミニコンと言われた小型コンピュータを扱いながらけっこう真剣に悩んだものです。

さて前回、デジタルがアナログと本質的に異なるところは、本物とは無関係に記号の意味を定義さえすれば何にでも使えることだと書きました。しかしこの特徴は、意外にわかったようでわからないのです。なぜなら、デジタル腕時計は時間やカレンダーを示すものだし、電卓は数字の計算を扱います。他にもデジタル体温計は温度、デジタル万歩計は歩数、デジタルヘルスメータは体重を示しますが、それぞれの用途にはそれで十分であり、記号の定義を変えてみようなどと考える必要もありません。その意味では、デジタルの意味はとびとびの数字ということでも十分かもしれません。

そもそもがコンピュータもその名(Computer = 計算するもの)の通り、大量の計算を速く・正確に行うのが目的でした。ゆえに、本質的な目的は電卓と同じだったのです。初期のコンピュータとは、まさに計算したり途中結果を記憶する装置を計算式にあわせて配線することで「プログラム」する、プログラム電卓と本質的に同じものでした。ところが、ある方式がコンピュータを根本的に変えてしまったのです。それが「プログラム内蔵方式(ノーマン型アーキテクチャ)」と呼ばれるものです。

ここでプログラムとは何なのか考えてみると、一般的な解釈は物事を行うための手順とされています。つまり計算に限らず、音楽会や式典など複数の出来事が順序にそって行われ

るとき、その順番と内容が記載されているものです。プログラム内蔵方式とは、この手順を数字を表現していた記号をそのまま使って計算の指示という意味の「命令」と呼ばれる記号の並びと考えるってしまうのです。言い換えれば、計算の手順を数字と同じように扱える仕組みなのです。

数字と同様に計算手順=プログラムを扱うとはどういうことか。まずは、これによってコンピュータ自身が自らのプログラムについて操作ができるようになります。残念ながら自分のプログラムを自分で作るコンピュータはまだ存在しませんが、コンピュータの数字を扱う仕組みを使って人間がプログラムを作ったり検証する(デバッグ)仕事にコンピュータを利用できるのです。さらには、高度な(人間の感覚に近い)言葉を原始的な命令に変換することでプログラムを作りやすく、デバッグしやすくできます。今では当たり前のこととはいえ、こうした操作ができるのは本質的に数字とプログラムを同じ記号として扱えるからなのです。

プログラム内蔵方式、すなわち数字とプログラムを同じに扱うという方式がコンピュータに与えた影響はプログラムに留まりません。この発想のジャンプは、ひいてはコンピュータを数字だけ扱う計算機からプログラムを含むあらゆる記号を扱う装置、いわば万能記号操作装置にしたのだと思います。今では誰もがよく知っている通り、パソコンやスマホで音声や画像を扱うのは当たり前です。立体的な画像や現実でない世界も表現できます。それらを記号として扱っているからなのです。もはやコンピュータを計算のための機械であり、電卓と本質は同じなどと考える人はいないでしょう。現代のデジタル全盛の根底にあるのはデジタルの特徴である記号を定義すれば何にでも使えるという性質であり、コンピュータが数字とプログラムを同じ扱いにしたことに始まっていると確信しています。

### たかがデジタル、されどデジタル (3) (2020/08/04)

本物の性質に近い別物を利用したアナログと、本物の性質は全く無視して定義された記号を扱うだけのデジタル。定義次第で何でも表すことができ、それを操作するプログラムさえ記号として扱う万能記号操作装置であるコンピュータ。それほど強力なものであるなら、なぜ昔からデジタルを使っていなかったのでしょうか。なぜ 1970~1980 年代に急速にデジタル腕時計、電卓、そしてコンピュータが急速にわれわれの暮らしに浸透していったのか。その理由は、デジタルのもう 1 つの特徴によります。

アナログを扱う装置では、その「仕掛け」として何等かの本物を模した仕組みがあります。例えば電卓が普及するまで計算機の代表であったそろばんには物の数に相当する玉があり、それを人の指が計算のルールに従って動かすことで結果を示しました。玉を 1 つだけ移動させた状態へあと 2 個を移動させれば 3 個の玉が集まり「 $1+2=3$ 」の結果を示しているわけです。そろばんに並んで普及していた計算器である計算尺は、掛け算・割り算が得意なので日常の計算よりは技術計算にもっぱら利用されました。定規のような形の部材に対数の目盛りを記してあり、それを 2 つ組み合わせると部材の長さを利用した足し算・引き算で計算する原理です(対数の足し算・引き算が掛け算・割り算に相当するので)。

これらの仕組みは、それ自体が本物の特徴を持っています。そろばんの玉は「1」(あるいは 5)を示しています。計算尺の部材は、その長さで数字の大きさを示しています。もっと言えば、アナログ時計はその針が時間を、アナログ秤の針は重さを、巻き尺は長さそのものを、アナログのスピードメータはスピードを模した動きをすることで情報を提供しているのです。これらに共通するのはアナログでは上手く本物の特徴を模したモノがあれば、比較的簡単な仕組みで成立することです。なんとなれば、装置そのものが原理的に本物の特徴を持つので機能を達成すること自体は難しくないので。

しかしながらアナログは半面、仕組みは比較的単純でも実用するには高度な技術が必要となります。そろばんの原理は石ころを並べても実現できるでしょうが、高速に正確な操作を行うには優れた部品を高精度に作り込む必要があります。計算尺を作ってみるのは簡単ですが、湿度など環境変化に強く正確な計算を行う装置を作るのは簡単ではありません。アナログ原理を利用した装置はほぼ例外なく専門的な製造・調整技術を必要とし、そのための高度な技術が不可欠となります。これは見方を変えれば、アナログとは部材が持つ「性能」を可能な限り絞り出し、さらに様々な利用環境や時間経過でもそれを失わないようにする技術に他なりません。それこそがアナログの真骨頂なのです(\*1)。

\*1: アナログコンピュータも存在した。数値を電気信号として微分方程式を解くもの

ひるがえってデジタルを考えると、定義されたあらゆる記号を扱う装置では本物の特徴を持つ仕組みは全く不要であるばかりか邪魔になります。特定の本物を示す特徴は、さまざまな定義で記号を扱うために利用してはいけません。もしもその特徴を利用してしまふと、ある定義の記号には有用かもしれませんが定義を変更できません(\*2)。それはデジタルの強力な特徴を利用できないこととなります。言い換えれば、デジタルを操作する仕組みは部品が持つ「性能」をできるだけ利用せず特徴を無くし、最低限の操作だけ行う必要があります。

\*2: 現実のコンピュータは数字という特定記号の操作は対応している

生産ラインの例でいうならば、アナログは得意技を持つベテランを並べた生産ライン、デジタルは新人もベテランも関係なくいろいろな人が並ぶ生産ラインです。アナログはスペシャリストが並んでいるので、その技能を活かせるものならば最小の人数で最高のものが生産できます。デジタルは技能もばらばらなので、最低レベルに合わせざるを得ません。ゆえに同じものを作ってもベテランより人数も時間もかかります。しかし得意分野が無いということは、何でも同程度のレベルでできるということです。ベテランのラインにやったことがない全く新しいものを作ってもらったら、素人と変わらない結果かもしれません。もしかしたらベテランが怒りだすかもしれませんね。いろいろなものを自由に生産できるようにするには(つまり万能記号操作装置を作るには)、ベテランの技能に頼った生産ラインは向いていないのです。これこそがデジタルを実現するしくみ、コンピュータが必要とするしくみです。これであれば仕事は簡単で覚え易く、経験の無い/浅い人や特殊な技術の無い人にも仕事をやってもらえます。一方でこれを実現するには、せつかく人を集めても最低限の仕事だけしてもらふことになり、そのぶん人数が必要となります。

コンピュータはもとより電気を使って記号の操作を行ってきました。電気を使って記号を操作するにはそれに適した仕組みが必要ですが、上述のデジタルの性質によりとんでもなく大量の部品(生産ラインの例では人に相当)を使う機械でした。世界で初めてといわれる米国の装置は、1946年に17,468本の真空管(もう知っている人も少ないでしょうが高級オーディオには使われています...)を使ったと言います。家庭のラジオ(アナログ)が3~6本ほどの真空管を使っていた時代に、です。やがて半導体を使ったトランジスタが用いられるようになりましたが、大量に必要なことは変わりません(\*3)。しかし1960年代にIC(集積回路)が発明され、ここから事態は急激に変化しました。ICはその名の通り複数のトランジスタを1つの部品に集積したもので、例えば6個のトランジスタが集積されれば部品の数は1/6になるわけです。さらにICが優れていたのは、いわば印刷と同様な技術で同じものを

大量に製造できたこととです(\*4)。分かりやすく言えば、それまで1文字1文字を書いていたのが印刷技術で同じ紙面の新聞を大量に印刷できるようになったことに相当します。くわえて、印刷でいえば文字を細かくすることで印刷できる文字数〜トランジスタの数がどんどん増えました。

\*3: トランジスタ以外にもリレーやパラメトロンなど多くの試みがあったが、数が必要なのは同じ

\*4: 印刷原理でない IC(ハイブリッド IC、モジュール)もあったが、デジタルでは淘汰された

この IC の技術は、「スペシャリストが少数より素人を多人数で」のデジタルにぴったり合致しました。大量生産で1つ1つのトランジスタの能力は高くなくても(\*5)、数があればよいデジタルの特性がこの上なく適しているのです。大型のコンピュータにも使われ、またたく間に普及し同時に値段が下がり性能は上がりました。集積するトランジスタもどんどん増えてゆきます(\*6)。印刷方式のミソは、1枚印刷するコストは大量に印刷するとそれほど変わらないことで、文字を小さくすると(集積するトランジスタを増やすと)どんどん1個あたりのコストが下がってゆきます。逆に印刷するための装置に投資が必要なので、大量の需要が不可欠となりデジタルを利用したものすごく大量の市場(\*7)が必要となりました。

\*5: 半導体の特性として製品の性能ばらつきが大きく、トランジスタ初期に(アナログには)使えないと言われた

\*6: これを表現するのが有名な「ムーアの法則」〜18 カ月でトランジスタが2倍になるというもの

\*7: これは今も同じで、投資額の増加でますます加速している。今はスマートフォンが最大市場

こうして IC 技術の進化により集積するトランジスタが飛躍的に増大したのが 1970〜1980 年代で、その出口になったのがデジタル腕時計であり電卓だったのです。電卓の技術開発から、1つの IC にコンピュータを入れてしまう試み(\*8)も出てきました。それがマイクロコンピュータ(マイコン)となり、やがてパーソナルコンピュータ(パソコン)が出現し個人がコンピュータを所持する時代になりました。最初はおもちゃと侮蔑されたマイコン、パソコンは、今やかつての大型コンピュータの市場にも浸食しただけでなく新たな情報技術(IT, IoT, DX)を生み出す基盤となっています。おりしも昨日8月4日は、1972年にカシオ計算機の電卓「カシオミニ」が1万2800円で発売され、1976年に日本電気が8bitマイコンキット「TK-80」(\*9)を発売した日だそうです。あらためて、時代の流れに想いを馳せてみたくになりました。

\*8: 1969 年、ビジコン社が Intel 社に発注。それが後の 4004, 4040, 8008, 8080 につながった

\*9: 8bit マイコン(8080 互換)を搭載し 16 進キーボード(0~F)と 7 セグメント LED で機械語を入力できた。¥88,500

## 分割せよ、しかるのち (1) (2020/08/11)

パソコンやスマートフォンの普及によって、メモリーという言葉も一般的になりました。もちろんメモリー(Memory)、すなわち記憶は元来が人の持つ能力につけられた名称ですが、例によってそれが転じてコンピュータで用いられることとなり「メモリー容量」や「メモリーカード」のような用例で普及しています。映画や小説、アニメ等でも、メモリーチップを敵と奪い合う争いなどよくあるストーリー展開ですね。実はコンピュータで用いられるメモリーですが、記憶というよりはそれを補助するため人類が太古から用いてきた記録の手段が元祖とっていいでしょう。

そもそも人は記憶を持つことでさまざまな活動を行っていますが、言うまでもなくこの記憶がなかなか厄介です。覚えるといっても、確実かつ正確・迅速に記憶するのは簡単ではありません。さらにそれを正確かつ適切に思い出すのも難しく、多くの人が学生時代にそれを経験したことでしょう。さらに年齢を重ねれば、人名などを思い出すのが困難となることもしばしばです。一方で、とても重要なことや繰り返し用いた内容、強い印象を受けた記憶はいつまでも残っています。中には忘れたいこともあるでしょうが、忘れたくても忘れられない記憶もあります。さらに記憶は長い年月で変化したり印象に左右されるため、多かれ少なかれ事実とは異なる記憶になることも少なくありません。

こうした人の記憶の課題を克服するため、人は古くからさまざまな「記録」の手段を模索してきました。この手段には2種類の要素が必要となります。1つは記録する手段で、もう1つが記録自体の「しるし」です。手段については石や木簡、植物繊維などへの着色や刻印が古くから用いられています。「しるし」は絵や楔形、原始的な文字などが起源でしょう。初期には現象をスケッチした絵(\*1)が用いられたと思われませんが(例えば壁画)、残したいこと・伝えたいことに限定してより多くの記録を残すためには「しるし」を簡略化して小さく・分かりやすく・読み取り易くしなければならなかったでしょう。実のところこの「しるし」こそが、記号に他なりません。「しるし」はやがて数字を含む文字になり、手段は紙への手書きから印刷術が生まれました。かくして、人間はコンピュータができる遙か昔から記号を用いて記憶を補助する「記録」を発展させ実用してきたのです。

\*1: スケッチはアナログ記録と言えるが、壁画は記録目的には非効率的

さてデジタルとは、本物とは無関係な記号を用いて定義を変えることでどのようなものでも表現し、操作できる仕組みです。初期のコンピュータは記号を数字として四則演算のような計算を行うことが主な目的となっていました。そのコンピュータがメモリーを用いる

ことになったのは、計算の途中結果をどこかに置いておくためです。例えば

$$x = a + b$$

$$y = c + d$$

$$z = x + y$$

といった計算をしたいとき、3つの足し算を行うしくみを用意してもいいですが、zの計算はxとyが計算されないと始めることができません。それならば、足し算を行うしくみは1つにしてx, yそしてzと順番に計算することでしくみ(前回説明したトランジスタ)を節約できます。ICが発明されるまでは大量のトランジスタを必要として苦しんでいたのも、こうやって少しでも数を減らすのは重要なことでした。ところが、これを3回に分けて計算するには途中のxとyを記録(記憶)しておいてzの計算を行うときに思い出してもらわなければなりません。これがコンピュータの元祖メモリーです。

こうしてメモリーはコンピュータに不可欠なしくみとして用いられますが、重要な点はコンピュータが万能の記号を扱う装置であるのと同様、メモリーも万能の記号を憶えて(書き込み)おき必要に応じて思い出す(読みだし)装置だということです。それを巧みに利用したのが、前々回に書いたプログラム内蔵方式です。計算手順、すなわちプログラムも数字などと同じ記号として扱うことで同様にメモリーへ憶えさせることができます。このことは、現代のメモリーカードに何でも(例えば写真でも、音声でも、住所録でも、アプリケーションでも)書き込んで利用できる(\*2)ことで直感的に理解できると思います。

\*2: 何のデータかは記号で区別されているが、メモリーは判別していない

さて、上述の計算例はデジタルに特有の重要な特徴を示しています。全部の操作を1度行うのではなく、3つの操作に分割して3回行っていきます。これを行うには途中結果を憶えているメモリーが不可欠ですが、アナログにはこれができないのです。そもそもアナログとは本物に近い性質を持つものでしたが、その性質を正確に記録して再び利用(再生)するのは非常に困難(\*3)です。くわえて、そういうメモリーが準備できても特定の性質しか記録できないので、操作の過程でできる様々な途中結果を記録しようとするとしかけが膨大になります。

\*3: 例えば計算尺のカーソルは一種のアナログ式メモリといえるが、精度はそれなりで低速(操作手しだい)

デジタルならではのメモリーを利用した操作の分割方法について、次回は具体的に説明

します。

## 分割せよ、しかるのち (2) (2020/08/18)

前述したようにデジタルが扱う記号を必要に応じて記録し、確実に保管したうえで必要に応じて正確に呼び戻すことができる、それがコンピュータにとって望ましいメモリーです。その意味では、メモリーや記憶という擬人的な名称を使っていますが、人間の記憶とは大きく性格が異なります。やりたいことは記号の「記録」であり、むしろ記号を保管する棚や倉庫と言った方がしっくりするかもしれません。

デジタルは多数の比較的単純な仕事を行うという性質があり、そこへ記号として定義された手順=プログラムを用いることで、コンピュータはどのような定義をされた記号にも適応できる万能記号処理装置になったと書きました。しかしながら、実はこれだけでは万能にはならないのです。なぜならば、1つの仕事を単純な仕事に分解したとしても、その単純な仕事を多数並べただけであれば元の仕事のみに対応した仕掛けに過ぎないので。万能とするには、あらゆる仕事に共通の要素=単純な作業を自由に組み合わせて最終的にどのような仕事にでも対応できる必要があります。

生産ラインの事例でいうならば、どのような製品を作る際にも必要となる基本的な作業(例えばネジを閉めるような)を決めておき、その基本作業にのみ対応するラインを作ります。基本的な作業なので、製品を作るためにはそれを何十回、何百回も行わないと完成かもしれません。しかしながら手間はかかるかもしれませんが、どの基本作業をどういう順序で行うかを指示することであらゆる製品が生産可能となります。コンピュータではこの基本作業の流れ全体をプログラムと呼び、基本作業の指示を「命令」と呼んでいます。プログラムがあらゆる基本作業の組み合わせを指示することで、万能の記号処理装置が実現できるのです。

ところがまだ問題があります。プログラムはどのような基本作業の組み合わせも指示できますが、その毎に基本作業のラインを組立直すような対応が必要となるなら(\*1)、それはとても実用的な仕掛けにならないでしょう。そこで基本作業のラインは1つだけ用意(\*2)しておき、その作業に用いる材料と作業結果は作業の度に仕掛品を置いておく棚に戻すことにします。この棚を多数用意しておき、プログラムはどの棚から材料を持ってきて、どの基本作業を行い、作業結果はどの棚に戻すのかを指示します。この棚こそが、コンピュータにおけるメモリーの役割なのです。

\*1: 電子回路では配線を変えるような仕掛けに相当

\*2: 性能を上げるために複数用意する方法は存在するが、基本動作は1つ

例えば A と B という部品を作り、組み合わせて C という製品を作る製造ラインがあったとします。これをプログラムでは、A の材料と A の置き場(棚)、A を作るのに必要な基本作業を指示します。同様に B についても指示します。そして A と B の置き場と C の置き場、C を作るのに必要な基本作業を指示することで C という製品が完成するというイメージです。コンピュータでは A, B, C としていずれも記号を扱いますが、材料と結果、途中仕掛品を保管する棚としてのメモリーが重要なことがお分かりいただけると思います。

全体の仕事を細かい作業に分解してそれを繰り返すことを、時間的な分割という意味で「時分割」と呼びます。記号であれば何でも扱え、正確に記録してまた呼び出せるメモリーの存在がこの時分割を可能とします。時間は分割しただけ(3 つに分割すると基本的に 3 倍必要)かかりますが、分割された作業が元の仕事に比べて単純になるのみならず、メモリーという棚を介してあらゆる組み合わせで作業の順序を指示できる利点があります。時間がかかることは、作業そのものの時間を短縮する(速度を上げる)ことでカバーすることもできます。ゆえに、コンピュータはこの時分割を使いうことで万能記号処理を実現し大きく発展しました。

訂正：「たかがデジタル、されどデジタル (3)」にて「おりしも昨日 8 月 4 日は」と書きましたが、正しくは 8 月 3 日でした。