



計算機の研究

Studies on Computer Science

渡辺 勝*

Masaru WATANABE

私は第二工学部、生産技術研究所を通じて、38年間、東大のお世話になりましたが、その間一貫して計算機の研究に終始してきました。今日はその経過をふりかえってお話したいと思います。これらの研究は私個人というよりは、研究室のメンバの方々の、私の参加したグループで行った研究が大部分であり、それらの方々のご協力で研究が進められたことに、まず感謝したいと思います。さて計算機の研究と申しまして、時代とともに研究の対象も、その方法も変わってきました。そこで時間的な経過もふまえて、これを5つぐらいの項目に分けて、お話してみたいと思います。

1. 計算機への招待

第2次大戦の始まるの時に卒業、兵役そして復員して第二工学部に勤務することになり、応用数学研究室に所属して、山内恭彦先生のもとで原子物理学の理論的研究に従事いたしました。当時は計算機といっても卓上型の手回し計算機しかない時代に、なぜ自動計算機の研究を志すようになったのか？ その動機ともなった研究を2つほどとりあげて、計算機の研究にかかわってきた経過を述べることにします。

(1) 中性子と陽子の相互作用

この研究は1949年に行ったものですが、その年は核力の中間子理論を提唱された湯川博士のノーベル賞受賞の年であり、また一方カリフォルニア大学の放射線研究所で、世界最大といわれた180インチのサイクロトロンが活動を始めた年でもありました。これによって90 Mev級の中性子が得られ、そのエネルギーをドブロイ波長に換算すると 10^{-13} cmとなって、核力の到達範囲に入ってきたことになり、実験的にその性質を解明する願ってもない手段が得られたことになりました。そこで中間子理論による核力にもとづいて、中性子陽子の相互作用を計算し実験と比較してみようということになったわけです。

中性子と陽子が結合してできた唯一の安定状態は重陽子であり、その結合エネルギーが2.19 Mevということが分かっています。一方中間子理論による核力のポテンシャルは

$$A \frac{e^{-\mu r}}{r}$$

とあらわされます。力の有効範囲を示すパラメタ μ は、中間子の質量に比例して決められます。残るパラメタ A はポテンシャルの深さに相当し、結合エネルギーが上の

値になるよう決められます。それには、シュレーディンガー方程式の固有値問題を A を変えてくり返し計算しなければなりません。ポテンシャルの形は比較的簡単に見えますが、解析解はなく数値計算によらなければなりません。こうして決めたポテンシャルは、陽子と中性子のスピニングが平行な場合（トリプレット）のもので、反平行なシングレットの場合のポテンシャルも必要です。詳細は省きますが、これはエネルギーが0に近い熱中性子の散乱断面積から求めることができます。

つぎは、このようにして求めたポテンシャルを使って、低エネルギー（1～6 Mev）の散乱断面積、および高エネルギー（90 Mev）の散乱角分布の計算を行って、実験データと比較してみたいわけです。この場合エネルギーを変えたり、高エネルギーで影響のする高調波（角分布を与える）についての計算が必要で、やはりシュレーディンガー方程式の数値解を多数回やらねばなりません。

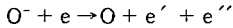
現在の宇宙航空研究所の前身で、当時理工学研究所といわれましたが、そこに佐々木達治郎博士らの試作された機械式の微分解析機がありました。これはパイロットモデルで規模も小さく、また、いろいろ調整もしなければなりませんでしたが、ともかく2階程度の微分方程式ならば解けるようになりました。上記の計算も数値的方法と並行してやり、一応の成果を得ましたが、精度は十分とはいえませんでした。また重陽子の電荷分布が球対称でなく、ラグビーボールのように細長い4重極モーメントを持つことを説明するには、方向性をもったテンソル力を導入し、2階の連立微分方程式を解かねばなりません。それには積分機の台数が4台しかなく、とても足りません。このような点が後に生研で新しく微分解析機を試作するきっかけになりました。

(2) 電子衝突過程の計算

計算機がたいへん役立ったもう一つの例をのべておき

*東京大学名誉教授

ます。それは電子衝突による原子の状態遷移の計算で、具体的に応用したのは、酸素の負イオンに電子が衝突して、電子をはじき出す過程についてです。



この場合、入射する電子および当初束縛されていた原子内電子の二つについて、初期状態と、遷移後散乱を受けた状態に対する波動関数を計算しておきます。そして電子間のクーロンポテンシャルを介しておこる状態遷移の確率を求めめるのですが、それは結局、上記波動関数を掛けあわせた二重積分を多数計算し、重みつき加算したもので表されます。この計算にも微分解析機を応用し約60個の二重積分を4日間で計算できました。手計算では1日に1~2の積分がやっとというところでしょう。

2. 微分解析機の完成

このような研究経過のほかにも、いくつかの応用計算の依頼を受けて実施したこともあって、微分解析機の有効性が、しだいに認められるようになりました。一方その頃、第二工学部が廃止され、生産技術研究所に転換するという事態を迎えました。生研の発足にあたっては中間試験研究が重要であるということで微分解析機の試作もその一つにとりあげられ、生研での計算機の研究がスタートしたわけです。

新たに微分解析機を試作するにあたっては、それまでの経験をふまえた上で、つぎの三つの点を目標にしました。

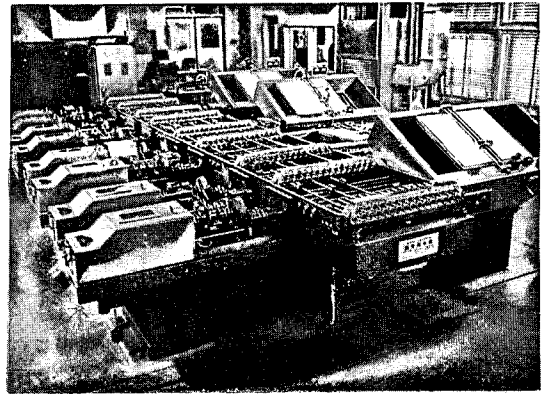
- (1) 精度の向上
- (2) 容量の増大
- (3) 使い勝手の良さ

試作は昭和26年から始められ、数年にわたって続けられ、昭和30年に完成しています。最終的に得られた性能を下の表にまとめておきます。なおこの試作には三井田純一、渡部弘之両君の非常な協力を得ました。

生研の微分解析機の特徴

1. 容量	積分機	8台	加算機	9台
	入力卓	3台	出力卓	1台
2. 精度	0.13% (サークルテスト法による)			
3. 特色	積分機の機構の大幅な改良			
	新設計のトルク増幅機			
	高性能の自動曲線追従装置			

微分解析機の基本要素である積分機は、回転円板とその上にあるローラで構成されます。積分機が組み合わされる関係で、ローラの先にはトルク増幅機をつけ、負荷



微分解析機

に備えています。たとえば sin 関数を求めるには2台の積分機をシリーズにつなぎ、2階微分方程式を解けばよく、その際、同時に求まる cos 関数と組み合わせると、出力卓に円を描かせることができます。実際にはローラの回転が反転するごとに、トルク増幅機や歯車などにガタがあってその影響で円の半径が90°ごとに増大し、ラセン図形になります。この半径の増大率から精度を決めたものが前記の性能表にあげた値になりました。この精度は当時としては、世界の最高の水準のものでした。

この性能を達成できた背景には、設計製作に大いに苦心したものでした。積分機の場合は、単体としての精度の向上、駆動部分の負荷の減少などをはかるべく、送りねじの加工精度や変位の伝達機構、あるいは回転円板の支持および駆動方法などに工夫をこらしたものです。一方トルク増幅機は回転ドラムにベルトを巻きつけて、その間の摩擦力を利用して増幅作用を行っていますが、純機械的な増幅機という点が特色で、当時電気的増幅機が実用になっていなかったのです。このドラムの材質にグラファイトを採用したり、ベルトをスチールにしてその取付部を改良して、できるだけガタを少なくする工夫をし、また連続使用による発熱の防止に努めました。

入力卓は複雑な関数を入力する手段に使いますが、当初は人手の操作に頼っていました。しかし長時間使用では疲労しますし、追従の精度や速度もよくありません。そこで光電式ヘッドを考案し、曲線の境界を追従して光の量を電気信号に変え、当時実用期を迎えたサーボモータを駆動するという自動追尾装置を試作しました。これによって追従の精度も速度も人手による場合よりも1桁近く向上し、何よりも操作の自動化というメリットを得ることができました。

微分解析機はその間、所内所外の各方面の分野の研究者から寄せられた多くの問題に応用されました。戦後間もなく瀬戸内海で沈没した戦時規格船について原因解明のための横揺れの解析、あるいは路面の凹凸による車の

振動など、戦後の乏しい時代に始まって、やがて技術革新の時代を迎えて新分野の研究が開始され、半導体や原子炉などの計算も持ちこまれるようになりました。

ところで微分解析機の応用に関係した興味ある技術として、積分機のフィードバック接続法にふれておきます。この方法は積分の独立変数の入力回転と、出力軸の回転の差を加算機で作って、円板の回転入力にすると、ふつうの従属変数の積分の代わりに、従属変数の逆数の積分が得られるという原理を利用したものです。微分解析機で、掛算ないしその積分は容易に出来たのですが、この方法によって割算ないしその積分も可能になったのです。もっとも面白い話には必ず落とし穴があるので、この場合も使用範囲に注意が必要ですが、それに気を付けたいへん便利な使い方ができます。その応用例として、微分方程式の特異点付近の解を求めるのに成功しました。いわゆる確定特異点では正則な解がありますが、数値計算では、まず級数展開して特異点近傍の解を求め、ついで少し離れた所で方程式の数値解を求める2段階の手間がかかります。これに対してフィードバック接続を応用すると、特異点から直接に解を得ることができます。このような方法で球ベッセル関数の原点付近、あるいはルジャンドル関数の1の付近を直接に機械で計算し、そのグラフを作ることができました。この場合に $0 \times \infty$ または $0/0$ という演算が機械で演出されているわけで興味深いものがありました。

3. ロケットとオンライン計算機

微分解析機は昭和30年に完成しましたが、それと時期を合わせたように、生研でロケットの開発が始まりました。ロケットの軌道計算は微分解析機にとって、かっこうの応用問題でした。秋田で実験が行われたベビーロケットやカップロケットは上昇高度もせいぜい数十から数百キロメートルで、垂直面内の2次元の運動方程式を解けば間い合いました。それでも2階の連立方程式で係数が複雑なこともあって、積分機8台をはじめ、生研の微分解析機の設備の全部を動員してやっと解けた次第です。とくに燃料の燃焼ともなって重量が時間的に減少しますが、この項が分母にあらわれますので、前記のフィードバック接続の手法を応用して、効率のよい結線を行いました。また空気の抵抗係数や、燃焼スケジュールなどの、解析的表現ができない関数は、入力卓から自動曲線追従装置で入力いたしました。

小型気象ロケット150 Tや、カップIV型、気温と風の観測用TW型などに適用して計算した飛しょう軌道を、レーダ観測した実際の軌跡と比較した結果、風による影響などもよく分かって、収穫になりました。

その後ロケットの開発は大型化の方向に進み、高度1000キロを越えるラムダ型やミュ-型へと進み、それに

ともなって発射場も鹿児島へ移りました。飛しょう距離が伸びてくると、軌道計算も地球の丸味や自転の影響を考慮に入れることが必要となり、もはや微分解析機の容量では追いつかなくなりました。幸いにそのころ(昭和37年)国産の電子計算機が実用期に入り、生研にもOKI TAC 5090 が設備できましたので、大型のロケットの性能計算はもっぱら電子計算機の力を借りることになりました。微分方程式の数値解法にはルンゲクッタ法を用い、誤差を抑えるため積分区間の自動制御を施すなど、精度の向上にはさまざまな工夫をいたしました。

その後昭和40年になりますと、ロケットの追跡用の指令制御精測レーダの設置が決まり、これに付属するオンライン計算機の導入が計画されました。この計算機に与えられた課題は、ほぼつぎの3項目にまとめられます。

- (1) レーダの追跡データを実時間で取りこみ、平滑化を施して、プロッタや磁気テープに記録する。
- (2) 予測計算を行ってロケットの未来位置を推測し、レーダのブラックアウト時に備えること。
- (3) 人工衛星の打上げにそなえて、その最適な点火時刻をオンラインで計算すること。

これらが実時間で処理されることが必要で、それにふさわしい性能を持つ計算機としてNEAC 2200 のモデル400 が選ばれました。しかし規定時間内に処理を終えることや、主記憶容量(48キロバイト)からくる制約のために、プログラムはアセンブラ言語で組まねばならず、メーカーの担当者の方にはたいへん苦心をお願いした次第でした。

処理方式としては、レーダデータの取込みを100ミリ秒ごとに行い、2秒間に20点集めて、平滑操作を施す。この観測値と前区間で求めておいた予測値との重み付き平均値を求めて、その時点での最確値にとるという結合方式が採用されました。さらにこの結合値を基準に運動方程式を数値積分して次の区間の予測値を求めるとともに、さらに積分を延長しブラックアウト時に備えて未来位置を計算しておきます。この結合方式はAtlantic Missile Range システムで採用されているものを参考にして、浜崎先生が検討された結果、結合係数を可変にして追跡状況に適応させるといった新機軸を取り入れてあります。ロケットの飛しょう軌跡を描くXYプロッタは、当時国産品にはドラム型のものしかありませんでしたが、これでは直視に不向きというわけで、新たに平面型のものを試作して実用にいたしました。

このようにしてまとめられた追跡システムは、その後最初の人工衛星“おおすみ”の打上げや、各種の観測ロケットの追跡に活用される一方、さらに改良を加えて10年近く使われておりました。しかし、やがて計算機は旧式になった上、負担する仕事はふえる一方で、性能的にも追いつかなくなり、昨年新計算機ACOS 700に置きかわりま

した。新しいシステムは、追跡、誘導、安全などの各サブステーションごとにミニコンピュータを配置し、これを回線で中央の主計算機に接続した、いわゆる分散型の複合計算機になっているのが特徴です。

このような複合計算機による分散処理についての研究のことをつぎにお話します。

4. 複合計算機の研究

この研究を始めたのは昭和44年のことです。当時研究室には小型計算機 FACOM270-10 がありましたが、補助記憶や高速入出力装置がなく、プログラムの作成に手間がかかりました。一方生研の主計算機は OKITAC から FACOM 270-30 にかわっていて、命令のコード系がほぼ同じである上に、補助ドラムや入出力装置が整備されていました。そこでこれを小型機のプログラム作成に使うことを考えたのです。この方法は現在はクロス方式といわれ、ひろく使われるようになりました。しかし出来たプログラムを紙テープに出して移しかえるのは、能率の上からも、パンチ装置におこり勝ちなミス点からも満足なものではなかったのです。そこで両方の計算機をハード的に接続して、直接にデータ転送してくる方法が浮かんできました。

計算機はそれまでは個々に独立して使われており、それらを接続する技術も、接続したシステムの応用方法も未知の分野であり、技術的な興味をそそられたことも研究の大きな動機でした。

接続の方法は次のようにしました。主計算機 270-30 には、計算機の設置目的であるオンライン処理用データチャンネルが設けてあり、一方小型機にもドラムをつけるための簡易チャンネルが組み込まれていたのは幸いでした。こうして両チャンネルを結合するためのインタフェースを試作することとなり、その名もデータを交換 (exchange) する意味で、コントローラ X と名付けました。この設計は当時大学院学生の杉本正勝君によるものです。

270-10 が 30 にデータを送る場合、まず 10 がライト命令を出し、その際 30 への割込み機能を利用して割込みをかける。これに応じて 30 側でリード命令が出され、両者のマッチングがとれるので、転送が実行される。逆に 30 から 10 にデータを送る場合、10 へ割込みをかけねばならず、10 側には割込み機能らしいものはなかったが、ドラムエラー発生検知用フリップフロップがあり、これを活用して間に合わせることができました。以上の論理設計に従って試作されたコントローラ X の部品には、ハネウェル社のマイクロパックという集積回路搭載プリント板を使いました。このプリント板実装用パネルの裏配線はパッチコードで行えるので、試作には好都合でした。

こうして計算機接続システムが出来上がり、データ転送プログラムや、小型機を端末にした会話処理システム

を作るなど、応用ソフトウェアの研究も進みました。

われわれの研究した接続方式は、後にチャンネル結合方式としてメーカーで実用化されました。富士通の CCA (チャンネルラッチャネルアダプタ) がその一例です。この場合インタフェースを分割して、両計算機側に各半分を所属させ、その間をケーブルでつなぐ 1/2 CCA 方式をとっています。生研でもその後、主計算機が FACOM 230-55 機に、同時に研究室もミニコンピュータ U 200 に更新できましたので、この CCA 結合を実現しました。このシステムはやがて、本郷の大型計算機センターと通信回線で結んでリモートバッチが実施できるようになりました。現在は 230-55 機はさらに M 160 機におきかわっていますが、CCA 結合は生かされて、計算機間のファイル転送に利用してソフトウェアの開発に貢献しているほか、将来はグラフィックスのような高速大量のデータ転送に役立ち、画像処理にも有効に使えるものと考えています。

5. 多様化の時代

60年代に実用期に入った電子計算機は、数年ごとにその性能を倍増するという目ざましい発展をとげました。より早く、より大きくということが当時の目標であったわけです。70年代に入りますと、それ以外に、さまざまな方向にむかって計算機技術の発展があったことが分かります。それらの特徴の主なものを挙げてみます：

(従来の技術)	(新しい技術)
バッチ処理	+ TSS, リモートバッチ処理
科学技術計算	+ 画像処理, 音声処理 情報検索, 人工知能
FORTRAN	+ PASCAL, BASIC, APL
共用計算機	+ 個人用, マイクロコンピュータ
集中型計算機	+ 分散型計算機
独立計算機	+ コンピュータネットワーク
ノイマン型計算機	+ 非ノイマン型計算機 (データフロー計算機)

これらのうち私の研究室でも研究課題として取りあげた、プログラム言語のことにふれておきます。

60年代までは計算機のソフトウェアは、個々のプログラマの腕にたよって、いわば手工業的方法で行われ、使用する言語も、技術計算の分野でいえば、FORTRAN が主という状態でした。計算機の応用がひろがるにつれて、作成するプログラムは大きくなる一方で、特にオペレーティングシステムのように何万、何十万ステップという巨大なプログラムもあらわれてきました。しかしプログラムは大勢の人をあてて、人海戦術でやるだけうまく出来るものでもないことも分かってきました。大き

表1 生研の計算機にインプリメントした高級言語一覧

機種 言語	U200	230/55	M160	作成年度	使用目的
Pascal - P Pascal 8000		○	●	1975 1979	汎用 "
Concurrent Pascal	○	○		1976~7	OS記述
BCPL	□	○	●	1978~9	システム記述
Modula	□		□	1978~9	OS記述
C			●	1979	汎用, システム
Lisp	○	○		1973	人工知能
SIM55		○		1974	OS教育

凡例 ○インタプリタ ●コンパイラ □クロスコンパイラ

なプログラムほど、製作の効率が悪くなるという現象もあらわれ、ソフトウェアの危機ということがいわれるようになりました。これが正式に認められたのは1968年に西独ガルミッシュで行われたソフトウェア工学の第1回会議の時でした。

この危機をどのように乗り越えたらよいか検討された結果、一方ではプログラミングの方法論についての研究が進められ、他方プログラムの生産性をよくする手法が開発されました。前者の代表的な成果が、構造化プログラミングといわれる方法であり、プログラムの制御構造やデータ構造化を進めたり、作成の過程を段階的に精密にして最終的にプログラムが出来上がる手法などがふくまれています。この構造化プログラミングに適したプログラム言語のあり方も研究され、PASCAL言語が登場してきました。一方このような情勢に対応してFORTRANにも見直しが行われ、FORTRAN 77として生まれ変わりました。

オペレーティングシステムは計算機の運用に欠かせませんが、とくに複雑かつ困難なプログラムとされてきました。これに対しても近年、その設計の方法論がしだいに確立され、また従来やむを得ず使っていた機械語（アセンブラ言語）に代えて、高級言語で記述する試みも着実に進められ、それなりの成果をあげてきました。その

中でもコンカレントパスカルで書かれたSOLO、かくれたベストセラーといわれるC言語で作成したベル研究所のUNIXなどが有名です。また低レベルでの入出力プログラミングを可能にしたModulaも注目されています。これらのシステム記述言語のベースになっているのが、構造化言語PASCAL、あるいはシステム記述用に開発されたBCPLであることも興味があります。

このように有望なプログラム言語を、生研の計算機でも利用できるようにしたいと考え、その実装をはかってきた結果を表1に示しておきます。これらは独自に作成したものもありますが、多くは移植の手法を用いて、既存のシステムを修正適用したものです。これらに関しては国外ではYork大学、スイスETH, Caltech, AAEC, Bell研究所、国内では東大大型計算機センター、理化学研究所、名大プラズマ研究所など多くの協力を得ました。

80年代を迎えて計算機のあるべき姿、また新しい応用の分野など、どのように発展してゆくか興味深いものがあります。それには若い方々の頭脳によるところが大きいです。皆様のご活躍を期待する次第です。

最後に私の研究生活を通じて寄せられた諸先生方のご指導や、職員、事務官の方々のご協力に対し、心から感謝の言葉をのべ、つたない講演を終わらせていただきます。
(1980年5月17日受理)

