講座

農業気象研究における電子計算機の利用

高 倉 直

(千葉大学園芸学部)

Computer Utilization in Agricultural Meteorology

Tadashi TAKAKURA

(Chiba University, College of Horticulture)

1 はじめに

近年科学および技術のあらゆる分野において、電子計算機が用いられている。農業気象・環境工学も例外ではない。そこで今回は我々の関係する分野において、電子計算機がどのように利用され、また利用されようとしているかを具体的な例とともに検討してみたい。

読者はすでに何らかの機会、あるいは雑誌によって、電子計算機とは何かということについてある程度の理解をえているとしよう。高倉(1971)でも明らかなように通常電子計算機はアナログ計算機とデジタル計算機とに分類される。デジタル計算機はアナログ計算機にくらべて複雑であり、入出力装置、演算装置、制御装置、記憶装置、外部記憶装置から成る。計算機というからには、デジタル計算機の中核は演算装置および制御装置であるといってもよいであろう。もちろん記憶装置を入れることもできるであろう。演算装置はもちろんアナログ計算機にもあるわけで、これはアナログ計算機の中核部でもある。そこで、ここで演算装置を持つものを一応電子計算機と考えて、実例を我々の関係分野からひろってみよう。

一般によく知られている電子計算機ははん用のもので比較的大規模であり、デジタル計算機に例をとれば、前述した装置のすべてを一応持ったものが多い。しかし俗にミニコンと呼ばれている小型電子計算機では、外部記憶装置の設置はオプションであり、また記憶装置も

Read Only Memory 呼ばれる一方交通の装置すなわち記憶されている計算ロジックなどの書き変えのできないもののみを持っている場合もある。

従って適材適所の電子計算機ということになると、はん用性を失うかわりに経済的かつ信頼性のあるものがえられるという可能性がある。さらにこのような電子計算機は通常のイメージにはおさまらないのが普通で、電子計算機を使っていることも知らずに装置として使用している場合もあるであろう。

電子計算機を用いると、現象をより一層正確に解析できるのではなかろうか。いいかえればより一層複雑な解析となる。そのために現象の全体的、感覚的の把握が困難になりやすい。意味のない数値や曲線を数多く作りがちなものである。これからは計算機のソフトウェアの時代だといわれる。たしかにこの傾向はあるが、ソフトウェアは常にハードウェアの上に立脚していることを忘れてはいけない。簡単な例をあげると、放射計を mV 記録計に接続する場合、どの mV 記録計でもよいのではなく、放射計の比較的大きい内部抵抗を考慮して、十分入力インピーダンスの大きい記録計を選ばなければならない。記録計の動作機能を研究の本質とは異なるとして理解しようとしていない人はいないように、電子計算機は研究の手段であるとして軽視することは危険であるといえるだろう。

現在までの電子計算機の利用を分類してみると Fig. 1 のようになる。また利用のされ方は A B C の順であり、現在 C 項に相当する研究が始まったといえる。図中○印の付された手法はこれからも重点的に行なわれると思われるものである。

昭和46年4月 全国大会シンポジウムの原稿に加筆したもの

Fig. 1. Classification of computer utilization.

B項シミュレーションに関してはデジタルアナログ手法を中心に解説したものがあるので(高倉, 1971), 今回はA項データ解析を簡単に説明することにも, C項制御について具体的な例をあげながら説明することにする。

2 オフライン計算

過去, 現在を通じて電子計算機の果たした役割は大きい。最近はかなり複雑な計算まで卓上型で計算できるようになった。

ここでいうオフラインとはバッチ処理をいうのではなく, 研究用実験装置と直接接続されていないという意味である。従って電電公社のプッシュボタン式の電話機による計算さらにはテープリードとモデムによる大型計算機の遠隔使用もオフラインと考える。換言すれば, 計算だけのために電子計算機のみを使用する場合である。

国立大学についてみれば, 全国の旧制大学に大型計算機が設置され, 現在これらを核として, 距離的に近い大学の小型機と通信回路線で結ぶ計画もかなり進められている。その他国立の研究機関にもまた全国の農業協同組合などにも, このような目的の計算機は数多く導入されている。各研究室単位で購入されているミニコンも, 本来の目的に使用しない時, すなわちあいている時にはオフライン計算に十分使用可能である。

ではこの分野において, どのような利用のし方が最も我々に適しているのであろうか。

応用科学あるいは工学の分野に属する我々としては, すでに開発された基本的なライブラリーを十分使いこなせればよいと考えられる。基本的なライブラリーとは使用する計算機, あるいは利用する計算センターによって多少異なるが, 各種の統計処理, 数値積分, 多項式の根, 乱数の発生, 高速フーリエ変換, 時系列解析, 行列の解法, プロットの使用などが主なものであろう。

各計算機メーカーあるいは計算センターは独自のライブラリーを用意しているのが普通であるが, 自分の要求にあうように豊富かつ有効に整っている場合はあまり多くないようである。東大大型計算機センターは全国にさがけて設立され, ライブラリー開発も比較的早くから行なわれてきたようである。ライブラリープログラムはかなり整備されたセンターといえるだろう(東京大学大型計算機センター, センターニュースおよびライブラリープログラム)。これらのライブラリーの使用方法は各センターがそれぞれ説明書を出しているのので, それを参考にして, 使用すればよいが, プログラムのアルゴリズムおよびリストは通常利用者に配布される形になっていない。特にアルゴリズムに関しては簡単に閲覧もできないようである。

このようなライブラリープログラムに関して, プログラムリスト, 計算式, 計算のアルゴリズムをすべて書いてある貴重なマニュアルとして, IBM Application Program, System/360 Scientific Subroutine Packageがある。これは米国で数年の研究生活を送った人ならば必ずといってよいくらい持ち帰っている本で, IBM 360以外の計算機にも一部修正して使用することができる。ただし一部のプログラム, 例えば乱数の発生などにおいては機種の違いにより分布などが変化することを十分考慮する必要がある。

B項のシミュレーションにおいてもこれらのライブラリープログラムをひんばんに使用する。ここではA, B項に共通する例題について検討しよう。

(i) 直達光に関する葉面の光合成速度

単位面積あたりの葉面の光合成速度はよく知られた次式で表わされる。

$$P = \frac{C_1 I \cos \varphi}{C_2 I \cos \varphi + 1} \quad (1)$$

ここで, P: 単位面積あたりの葉面の光合成速度

I: 法線面光強度

φ : 葉面への入射角

C_1, C_2 : 定数

また葉面への入射角(φ)は次式で求められる。

$$\varphi = \arccos[\sin h \cos \theta + \cos h \sin \theta \cos(a - \alpha)] \quad (2)$$

ここで、 h ：太陽高度

θ ：葉面の傾斜角

a ：太陽方位

α ：葉面の方位角

(2)式で φ を求め(1)式に代入すれば P が求まる。これを手計算で行なう場合には、三角関数表を用いながら、 $\cos \varphi$ から φ を求めるのが一般的である。この計算を群落などに適用しようとすれば計算量が莫大となり手計算というわけにはいかない。電子計算機を用いて(2)式を解く場合、 $\arccos$ という関数をライブラリー関数として持っている計算機を使用する場合は簡単で $\varphi = \text{ACOS}(\quad)$ とすることでたちどころに φ が求まる。もしこれが利用できない場合にはニュートン・ラフソン法と呼ばれるくりかえし計算で求めればよい。すなわち、(2)式から

$$\cos \varphi = \sin h \cos \theta + \cos h \sin \theta \cos(a - \alpha) \quad (3)$$

であるから、これを Y と置くと、

$$\cos \varphi = Y \quad (4)$$

(4)式をもとに計算のための近似式を求めると

$$\varphi^{n+1} = \varphi^n + \frac{(\cos \varphi^n - Y)}{\sin \varphi^n} \quad (5)$$

となる。すなわち n 次元目の φ の近似値 φ^n を用いて、それよりさらに真の φ に近い値すなわち $n+1$ 次元目の近似値 φ^{n+1} は(5)式を計算することによって求まる。数値解法に関する参考書であれば必ず載っているといえるくらいの手法で、Kreyszig (1962)にはわかりやすく解説されている。この本はわかりやすい応用数学書としても有名である(日本語訳あり)。

(ii) 夜間におけるハウスの温度環境

問題を簡単にするために、無限に広いハウスを考えよう。そうすれば熱の移動は1次元、上下方向のみ考えればよく、放射に関する形態係数はすべて1となり考慮しなくてよい。ただしこの単純化は計算解法の焦点を明確にするためのみ行なうもので、このような仮定を用いなくても、同様な問題を解くことは可能であり、実際のハウスの解析を目的とするならば、このような仮定を用いることは致命的な欠陥をもたらすことは明らかであることを特にことわっておく。

温室内地表面での熱収支式は

$$Q_s = \sigma(T_s^4 - T_g^4) + h_i(T_s - T_i) \quad (6)$$

温室のガラス面での熱収支式は

$$R + h_o(T_g - T_o) = h_i(T_i - T_g) + \sigma(T_s^4 - T_g^4) \quad (7)$$

温室内の対流伝熱量に関して

$$h_i(T_s - T_i) = h_i(T_i - T_g) \quad (8)$$

ここで、 Q_s ：地中伝熱量

σ ：ステファン・ボルツマン定数

T_s ：地表面絶対温度

T_g ：ガラス絶対温度

h_i ：温室内表面の対流熱伝達率

T_i ：温室内絶対気温

R ：外表面純放射量

h_o ：ガラス外表面における対流熱伝達率

T_o ：外気絶対温度

方程式(6)、(7)、(8)において、未知数は3個、 T_g 、 T_i 、 T_s である。いろいろの解法が考えられるが、未知数を1つへらしても温度に関して4次の連立方程式を解くことになり、解析的には困難である。電子計算機を用いる場合収束が早いということは1つの大きな利点であるから、ここではニュートン法について説明しよう。

まず T_i を消去すると、(6)、(7)式から

$$F(T_s, T_g) = 0 \quad (9)$$

$$G(T_s, T_g) = 0 \quad (10)$$

なる2式を作ることができよう。(i)の場合と同様 n 次元目の近似値 T_s^n 、 T_g^n がそれぞれ与えられたとすると、 $n+1$ 次元目のよりよい近似値は次の式で与えられる。

$$T_s^{n+1} = f(T_s^n, T_g^n) \quad (11)$$

$$T_g^{n+1} = g(T_s^n, T_g^n) \quad (12)$$

ここで、 $f(T_s, T_g) = T_s + \delta(T_s, T_g)$

$$g(T_s, T_g) = T_g + \epsilon(T_s, T_g)$$

$$\delta = \frac{\begin{vmatrix} -F & F_s \\ -G & G_s \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} F_g & F_s \\ G_g & G_s \end{vmatrix}}$$

$$\epsilon = \frac{\begin{vmatrix} F_g & -F \\ G_g & -G \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} F_g & F_s \\ G_g & G_s \end{vmatrix}}$$

$$F_s = \frac{\partial F}{\partial S}$$

である。(11)、(12)式を解くことによって、くりかえし法により、 T_s 、 T_g を求めることができる。

このような手法を用いた例は、放射交換を含む葉面の熱収支(Gate, 1968; 佐伯, 1971)、温度計エレメントの放射による誤差(武智, 1972)、ハウス内の光分布(古在ら, 1972)、温室の温度環境のシミュレーション(Takakura ら, 1971)などに見ることができる。

3 オンライン計算

アナログ式の例を Fig. 2 に示す。これは Inoue ら(1969)によって報告されている炭酸ガスフラックスを測定するアシミトロンと呼ばれる測定器の演算部をわかりやすく図示したものである。測定される物理量は長方

Fig. 2. Arithmetic elements of "assimitron".

形ブロックでかこまれた ΔC , $T'w'$, ΔT で、2点間の炭酸ガス濃度差、温度垂直方向の風速変動量の平均、および温度差の平均を表わす。これらのものが電圧変化として表わされると、アナログ計算機の演算器同様に、これらに演算をほどこすことが可能となる。 ΔC に k を乗じたあと時間に関して積分し、さらに $1/k\theta$ を乗ずると ΔC が求まる。あとは乗算器、および除算器を用いて、求める P_a を計算することが可能である。

同様な装置で、時間遅れを考慮したものも開発されているようである(矢吸, 1971)。

これらアナログ演算器を用いた計算は、従来のトランスデューサをそのまま用いることができること、変化量を連続曲線として図示できること、各演算器が比較的安価であることなどから、自作も容易だという長所もあるが、アナログ式の欠点としては、ドリフトと変数の変化の区別がつけにくい。すなわち測器の誤差も測定量の変化と解釈してしまう恐れがあること、従って長時間続けて使用できないという大きな短所がある。さらに演算式が固定していない場合、あるいは演算式を変更したい場合、ハードウェアである演算器、配線などの変更が必要になってくる。

Fig. 3. Block diagram of data acquisition and analyzing system.

一方デジタル式のブロック図を Fig. 3 に示す。これは従来のデータ集録装置(高倉, 1968)にディジ

タル計算機を加えたものと考えればよい。測定しようとする物理量はアナログ式の場合と同じとしよう。これらはトランスデューサで電気的变化に変換されるがここまではアナログ量として変化する。これがADC(アナログデジタルコンバータ)により量子化される。従ってここまでに混入する誤差についてはアナログ式とかわりわがないが、いったん量子化されると、ノイズと信号の変化は明確に区別することが可能となる。計算機による演算はCPUの部分で行なわれるが、演算はプログラムによってソフト的に自由に変えることができる。結果は数字としてプリントしたり、さらに高度な処理のための入力データとするために紙テープにパンチしたり、アナログ変化としてブラウン管に表示させることも可能である。比較的高価であるが、長時間使用しても誤差が少なくまた演算のアルゴリズムを自由に、ハードウェアを変化させることなく変えることができることは大きな利点であろう。

これが活用される分野としては、多要素の測定およびそのデータをもとにした解析、データの保存を考えなければならない分野であり、気象の長期観測、群落環境解析などが考えられる。

4. デジタルコントロール

デジタルコントロールは、従来のアナログ調節計でプロセスを個々に制御させると同時にこれらの調節計の設定値の変更などをデジタル計算機で行なう監視制御と従来のアナログ調節計をいつさい使用せずデジタル計算機で末端の制御機器(例えばリレー、ステッピングモータなど)を制御するDDC(ダイレクトデジタルコントロール)に分けられる。長所はそれぞれあるが、DDCは従来の制御方式をハード的なものからソフト的なものに変えたという意味で画期的なものである。大規模なプロセス、複雑な制御、例えば植物生育のコントロールにおいては経済的かつ効果的である。アナログ調節計では処理できない複雑な制御はさておき、一般のプロセスにおける両者の経済的比較は大きな関心事の一つであろう。Williams と Ryan (1969) によれば、制御ループ50個において両者の経済的コストは一致し、制御ループ数がそれより増すことによって、DDCは経済的となる。ここ数年LSIの開発などにより計算機のコストダウン、MTBF(故障から次の故障までの平均持続時間)の増大などでDDCはさらに経済的となることが想像される。これはよく大規模な冷暖房装置のある機械室に行くときみかける壁いつばいのアナログ記録調節計が小さな1台のテレタイプに置き換えられることを考

えても想像できることである。

ここでは我々が現在研究中の D D C による植物生育のコントロールを未発表のデータをおりまぜながら説明しよう (高倉ら, 1972)。

制御にデジタル計算機を用いた場合のその機能は Fig. 4 で説明される。一口でいえばオンライン計算の項で述べたようにコントロールロジックをソフト的に自由に変更することができるということである。すなわち計算機は魔女といえることができる。

Fig. 4. Computer role in direct digital control.

Fig. 4 に従ってこのことを具体的に考えてみよう。検出すべき環境要素としては、温度、湿度、風速、炭酸ガス濃度、……、光強度である。これらの要素をもとにして、アナログ調節計を用いてあるプロセスの制御を考えると、各要素あたり最低 1 台の調節計が必要であり、かつどのようなロジックで制御するかをあらかじめ決定し、それが実行されるようハード的な配線なり設備をほどこさなければならない。大規模なプロセスあるいはコントロールが複雑なプロセスにおいては、いつたん作られたハード的な制御回路の変更は容易ではない。従ってハウスの環境調節あるいは植物生育のコントロールのように、どの要素とどの要素をどのようなロジックで結合したら最適な制御になるかということが明確になっていないプロセスにおいては、アナログ式制御は不経済かつ効率のよくない方式であるといえるだろう。

ではデジタル式の場合はどうであろうか。この場合、入力である温度などの環境要素と末端の制御機器とはデジタル計算機を通して結合されているとはいうものの、まったく独立に存在するといってもよく、ハード的にこれらのものが結合されたからといっても、すぐに制御動作を行なうというものではない。制御動作を実行させるためには、計算機に Fig. 9 ~ 11 にあるようなプログラムを入れなければならない。このようなプログラムによって始めて制御が実行される。このプログラムはいわば紙と鉛筆で作られるものでハード的なものをいっさ

い必要としない。表現も数式でも論理式でもよく、あらゆる要素の組み合わせで複雑な制御も可能である。さらに記憶装置もあわせそなえているので、植物生育のコントロールになくしてはならない時間遅れを含む制御が容易である。すなわち前日あるいは前々日の状態によってその日の制御ロジックを変化させることができる。しかもこのプログラムを書くことはシステムプログラムの開発、発展により著るしく容易になってきており、今や科学技術計算用のはん用語として中学、高校の数学にもとり入れられようとしている FORTRAN 言語によって書くことができる。

以下に我々が現行研究中のシステムを具体例としてとり上げ、D D C を説明しよう。

Fig. 5. Direct digital control of plant environment.

Fig. 5 にシステムの概要を示す。ハウスのモデルとしてのグロースチャンパー内の環境要素および植物の光合成速度、蒸散量など 24 チャンネルの要素はトランスデューサによって 0 ~ 10 mV の電気信号 (アナログ量) に変換される。このアナログ量は時計機構によりコントロールされた AFC-8 によって、各要素ごとに取り上げられ、アナログ-デジタル変換によって量子化された後、デジタル計算機本体、PDP-8/E に送られる。本体は記憶容量 8 Kword、拡張演算機構を持つ。この本体には入出力装置としてのテレタイプ (ASR 33) および外部記憶装置ディスク (RK-8) が接続されている。外部記憶装置の容量は約 831 Kword である。計算機からの出力信号はすべてデジタル信号で自作したインターフェースを通して、リレーまたはトランジスタスイッチに送られる。総計 30 チャンネルのメカニカルリレーおよびトランジスタリレーが駆動できる。

ここで自作したデジタルインターフェースおよびトランジスタリレー回路の説明しよう。Fig. 6 にロジックのブロックダイアグラムと命令語の種類が示されている。命令語としては Clear (現在 ON になっているスイッチをすべて OFF にする)、Set (アキュムレータに 1 が

Fig. 6. Logic diagram and instructions of AC switch.

あるところに対応するスイッチをONにし、0があるところは現在の状態を保つ)、Jam Transfer (アキュミレータに1があるところに対応するスイッチをONにし、0のところはOFFにする)、Reset (アキュミレータに1があるところに対応するスイッチをOFFにし、0があるところは現在の状態を保つ)の4種類でかなり複雑なコントロールが可能となるので、この4種類の命令語を製作した。この論理で考えるとPDP-8/Eのアキュミレータは12ビットであるから12チャンネル以上のスイッチを動作させることが不可能のように思われるが、これはデバイス番号をちがえることにより、より多くのチャンネルを作ることができる。すなわち計算機の機構上12チャンネルごとに1つのデバイス番号が与えられる形になる。計算機本体に接続されるすべてのデバイス(周辺機器)にはそれ独自の番号が与えられているわけで、テレタイプも例外ではない。従って現在使用されている番号と将来使用を予定している番号を除いて、この番号を決めればよい。PDP-8/Eの場合、BMB信号ラインの3～8ビットの6ビットがこのデバイス番号用にあってられている。従って最大限64個まで可能である。あらかじめ決められた番号の信号が本体から来たときのみそのデバイスが動作するためにはデバイスセクタ(M103)というモジュールが必要である。これは一種のNANDゲートで、本体の信号とそのデバイスの番号が一致したときのみ出力がLow(デジタルの信号はすべてHighかLow決っている)になる(Logic handbook, 1971)。

命令語を作る場合、利用がきるパルスはIOP1, IOP2, IOP4という、External Busから600nsおきに出る3つのパルスである。これをデコードして最大8個の命令語を作ることができるが、BAC(本体のアキュミレータの内容が送られてくるライン)と組み合わせるとさらに多くの命令語を作ることができる。我々の場

合この基本的な3個のパルスを用いてFig. 6に示されるような4個の命令語を製作した。Truth TableからわかるようにClearにはIOP1を、SetにはIOP2を、Jam TransferにはIOP1とIOP2を、ResetにはIOP4を利用する。Fig. 6にあるブロック図の構成は向って左上からNANDゲート、その下のANDゲート、その右側NORゲート、さらにSRタイプのFF(フリップフロップ)、ACスイッチのK614モジュール(Control handbook, 1971)、ヒータまたは冷凍機の接続端子となっている。Clear動作の場合、IOP1のパルスが出る。これは直接NORゲートの一端に入っている。NORゲートは2つの入力のうちどちらか一方がHighであると出力がLowとなるもので、他の入力LowであるからIOP1によってこのNORゲートの出力はLowとなりFFのR(Reset)端子がLowとなる。このFFは各入力がLowになったとき、その動作を行なうので、これによりFFはリセットされK614のスイッチはOFFとなる。Set命令の場合はどうか。この場合、IOP2パルスが出る。IOP2の信号はBACとともにNANDゲートの入力となっている。NANDゲートはこの2入力がともにHighのときにのみ出力がLowとなる。従ってアキュミレータの内容が1のところのみNANDゲートの出力がLowとなりFFはS(Set)端子がLowとなりセットされる。すなわちこのFFが1となる。これによりK614はONとなる。Jam Transferの場合はBACが1(High)のときFFのS端子がLowになり、BACが0(Low)のときFFのR端子がLowにならなければいけない。この場合はIOPパルスがすべて同時に発生するのではなくある時間をおいて発生することをうまく利用している。まず最初に出るIOP1のパルスでFFをリセットしておき、次にSet命令を実行することによってJam Transferを実現させている。従ってBACが1のときもいったんはIOP1でFFはリセットされるが次の動作までの時間は数百nsecでありK614の応答性よりはるかに早く、K614は最終結果によってのみ動作する。Reset命令はIOP4とBACを用いて行なう。IOP4とBACがともにHighのときANDゲートの出力がHighとなる。これによって、それに続くNORゲートの出力がLowとなりFFはリセットされる。その結果K614はOFFとなる。

これでDDCのボードの準備ができたので次に制御ロジックを簡単な空調回路を例にして説明しよう。

まずプログラムを作る場合にフローチャートを書くことが望ましい。Fig. 7と8にその例を示す。

Fig. 7. Sequential control.

Fig. 8. Flow chart of greenhouse temperature control.

DDCのプログラムは大きくわけて(i)Interrupt方式と(ii)Sequential方式がある。Interrupt方式とは、計算機本体がデバイスからの要求によって始めてその要求のあったデバイスの仕事を行なうやり方で、要求のない間は別の仕事を行なっている。Sequential方式とは、計算機本体があらかじめ決められたプログラム順序に従って各制御機器にコントロール指令を出して行く方法で計算機本体にくらべて応答動作速度の遅い周辺機器の準

備ができるまで、計算機本体はループを形成して待っている。両方式とも、それぞれに長所、短所を持っているが、ミニコンを使用し、周期的に必ず各デバイスのコントロールが必要でかつ各デバイス間に明確な優先順位がない場合にはSequential方式が適しているといえよう。

従って今回はSequential方式について詳しく説明しよう。この方式のブロック図はFig. 7に示されている。計算機はまずAという仕事を実行したのちBという仕事に移る。次にある条件を判定しCまたはDのどちらの仕事をするべきか決めたのち、その一方を行ない、さらに仕事Eを実行する。そこでまた仕事Aに戻るのであるが、このくりかえし周期が適当であるようにIdlingすなわちむだ時間をすごさせる。この時間はシステム特性によって決められる。

ハウスの暖房を容量の異なる2台のヒーターと冷房を1台のファンで行なう簡単なプログラムをFig. 8に示す。これは制御プログラムの部分だけをサブルーチンにしたもののフローチャートである。実際のプログラムはFig. 11に示されている。まず最初にTEMP(測定されたハウス内気温)とTUP(設定温度の上限)を比較する。もし $TEMP - TUP \geq 0$ であればハウス内気温が設定温度の上限を超えたわけで、ヒータを2つとも切り、換気ファンを入れたのち、あるむだ時間をへてこのプログラムを終る。もし $TEMP - TUP < 0$ であれば向って右側のパスとなり、 $TEMP - TLO$ (設定温度の下限)を比較する。ここで、 $TEMP - TLO > 0$ すなわちハウス内温度が設定温度の下限より高い場合、制御機器は現在の状態を続けることになる(No Change)。もし $TEMP - TLO \leq -EP$ (限界温度)であると、ハウス内温度が何らかの理由で急激に低下したのであるから、出力の大なるヒータを入れると同時にかくはん用ファンもまわす(Heater 2 On, Fan 2 On)それ以外の場合は、出力の小さいヒータすなわちHeater 1を入れ、かくはんする。以上のフローチャートをプログラムにしたのがFig. 9である。

ここで話を実際のプログラムに移して、実例を上げながら説明しよう。Fig. 9は温度などの測定信号を計算機本体へ送るためのプログラムである。

我々の使用しているPDP-8/Eは既に報告したように(高倉, 1970), ミニコンのIBMといわれるDEC社の最新型計算機で、全世界で広く使用されており国産機種に比較して格安である。特にソフトウェアの開発においては国産と比較して、10年以上の開きがあるといつてよく、原則としてソフトウェアはサービスであるという方針である。このような事情を背景に生れたミニコン

```

FUNCTION AFC8(ICHAN)
S      SKPDF      ADSF      6531
S      OPDEF      AD SG     6542
S      OPDEF      ADRB      6534
S      OPDEF      AD SC     6544
S      CLA
S      AD SG
S      TAD        I          \ ICHAN
S      AD SC
S  S1,  ADSF
S      JMP        S1
S      ADRB
S      DCA        \ J
      TEMP=FLOAT(J)
      AFC8=TEMP*4.88
      RETURN
      END

```

Fig. 9. Program written by SABR and FORTRAN which converts input analog signals to microvoltages.

用のオペレイティングシステム PS/8 は非常に優れたシステムといえることができる。詳しくは後述のマニュアルを参考にしようとして、ここでは我々の作ったプログラムを通して、その特徴を2, 3説明しよう(8 K Programming system user's guide, 1971; Software support manual, 1971)。

このシステムのもとで利用できるプログラムハンドラーは FORTRAN コンパイラ、ローダ(コンパイルされた FORTRAN プログラムをロードするもの)、FOCAL (DEC社が開発した対話用言語で BASIC に類似なもの)、PAL-8, SABR アセンブラ、アブソルートローダ、オディティ(オクタルによるデバク)、シンボリックエディタ(プログラム修正、製作を容易にするもの)などである。このシステムで FORTRAN プログラム(ソースプログラム)をコンパイルするとシンボリック言語である SABR に翻訳される。これがさらにオブジェクトプログラムにアセンブルされるわけで、この関

係をうまく用いて、FORTRAN のプログラムに SABR のプログラムを混入させることができる。FORTRAN というはん用言語のみで、制御プログラムが作れるのが理想であるが、周辺機器が統一されない限り、命令語も異なり不可能である。すなわち FORTRAN にはリレーを ON したり OFF したりする命令はない。そこでこの制御に必要なプログラムだけを FORTRAN と制御プログラムを作りうる SABR とを混ぜて作り、それを FORTRAN のサブプログラムとしておけば、メインプログラムは FORTRAN のみで作ることができ、通常はサブプログラムの内容を知る必要がなくなる。従ってこうすることによって、制御プログラムを FORTRAN だけで書くことが可能となる。

Fig.9はこのような考えのもとに作られた FUNCTION プログラムである。前述の入力アナログ信号をデジタル信号に変換する機器名 AFC8をそのまま FUNCTION 名として用いている。引き数 ICHAN は、今必要とする入力のチャンネル番号である。2—5行はそれぞれ命令語を定義している。計算機が理解できる命令語は2進数(あるいは8進数)であり、例えば ADSF を6531に定義することにより、これ以後 ADSF と用いるとそれは6531を意味するところになる。FORTRAN プログラム中で第1カラムに S と印すことはそのステートメントが SABR 言語で書かれていることを意味し、このような形で SABR と FORTRAN をまぜることが可能である。6行目の命令語 CLA でアキュミュレータをクリアし、次の AD SG で AD コンバータのゲインをセットする。この一連の命令で入力レンジが 0~10mV にセットされる。次の命令で読み込もうとするチャンネルをアキュミュレータへ入れ、AD SC (AD コンバータのチャンネルセット)を行なう。一般には AFC8 の AD コンバートは時間を必要とするので、AD SF (AD コンバータのフラグがセットされたかどうかを調べる命令)と JMP (ジャンプ命令)でぐるぐるまわりながらフラグの上のを待つ。上れば JMP 命令はスキップされ次の ADRB が実行される。これによって量子化された量がアキュミュレータへ格納される。次の DCA でこの量(整数)が J という番地へ格納される。あとはこの変数 J を FORTRAN で取り出すことを考えればよい。量子化された数はすべて整数であるからこれを実数に変換し、4.88を乗ずる。この AFC8 の分解能は1ビットで、0~10mV が11ビットで表現されるため、最小の1ビットが 4.88μV に相当するからである。

Fig.10は温度制御のためのメインプログラムであり、Fig.11はこれに用いた制御サブルーチンである。まずメ

EX37

```

C      TIME DELAY SET
S      CLA
S      TAD      (7013) /5 SEC DELAY
S      DCA      \ITIMO
S      TAD      (7777
S      DCA      \IMIN
C      CONSTANTS      0.5 DEG ACCURACY
      TUP=1.32
      TLO=1.30
      COF=10.0
      EP=5.0
C      TEMPERATURE MEASUREMENT
10     CONTINUE
      TEMP=AFC8(0)/1000.0
      CALL PIDC(TEMP,TUP,TLO,COF,EP,ITIMO,IMIN)
      GO TO 10
      END

```

Fig. 10. DDC program for temperature control.

EXOFF

```

SUBROUTINE PIDC(TEMP,TUP,TLO,COF,EP,ITIMO,IMIN)
IGRP=1
IF(TEMP-TUP)      20, 10, 10
10     CONTINUE
      CALL RLYCA(IGRP)
      ICHAN=3
      CALL RLYST(ICHAN)
      GO TO 70
20     EVA=(TEMP-TLO)*COF
      IF(EVA)      40, 30, 30
30     GO TO 70
40     IF(EVA+EP)      50, 50, 60
50     CONTINUE
S      CLA
S      TAD      (7000
S      DCA      \IOCT
      CALL RLYJM(IGRP,IOCT)
      GO TO 70
60     CONTINUE
S      CLA
S      TAD      (5000
S      DCA      \IOCT
      CALL RLYJM(IGRP,IOCT)
70     CONTINUE
      CALL DELAY(ITIMO,IMIN)
      RETURN
      END

```

Fig. 11. Subroutine program for temperature control.

インプログラムはディスク上の EX37 というファイルに格納されており、他に EXOFF というファイルがある。これは全てのスイッチを切るためのプログラムが格納されているもので、EX37 が終りのないプログラムであるため特に用意されたものである。EX37 の中にはまだ SABR ステートメントが含まれているが、もちろんこれはサブプログラムとして独立させることができ、EX37

中はすべて FORTRAN ステートメントにすることは容易である。このプログラムの主要部はステートメント番号10以下である。まず、AFC8(0) で0チャンネルの熱電対出力をmVで検出する。その値は変数名TEMPに格納される。これによってPIDCが呼ばれ、この中でFig. 8に示したフローチャートおよびFig.11のプログラムによって温度の上限、下限と比較され、ヒータやファンが動作する。

Fig. 11に示されているサブルーチンPIDCを見ると、その中でさらに4つのサブプログラムが呼ばれているのがわかる。RLYCAはすべてのACスイッチ(IGRP=1)であるから、グループ1に含まれる12個のACスイッチ)を切るサブプログラムであり、RLYSTはICHANで指定されたチャンネルのACスイッチを入れる命令である。これによりヒータが切れ、換気ファンのスイッチが入る。RLYJMでは、グループ1の中でIOCTで1ビットが立っているところのスイッチだけが入る。これによって12個のスイッチを同時に操作できる。DELAYは、これによって時間遅れを生じさせるもので、ITIMOおよびIMINを適当に選ぶことによって任意の時間遅れを作ることができる。その他のステートメントはFig. 8のロジックと比較することによって一応理解できよう。

5. おわりに

今回はDDCとはどうゆうものかということハードおよびソフトの両面から紹介した。また次の機会により複雑な制御、最適制御などについて我々が行なっている研究をもとに紹介したいと思っている。これを機会に電子計算機の食わずざらいの方が1人でも多く、何らかの機会を求めて、計算機になじむことを欲してやまない。

参考文献

- DEC (1971): *Control Handbook* 1971. DEC Maynard, Massachusetts, 408pp.
 —, (1971): *Logic Handbook* 1971. 362pp.
 —, (1971): *PS/8 8K Programming System User's Guide*.
 —, (1971): *PS/8 Software Support Manual*.
 Gate, D. M. (1968): Transpiration and leaf temperature. *Annual Review of Plant Physiology*, 19, 211—238.
 IBM (1967): *Application Program, System/360 Scientific Subroutine Package*. International Business Machines Corporation, New York, 329pp.
 Inoue, E., Uchijima, Z., Saito, T., Isobe, S. and Uemura, K. (1969): The "Assimatron", a newly devised instrument for measuring CO₂ flux in the surface air layer. *J. Agr. Met.*, 25, 165—

- 115.
- 古在豊樹, 杉二郎 (1972) : 温室内の日射量に関する研究(2), *Ibid.*, 27, 105—115.
- Kreyszig, E. (1962) : *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley and Sons, New York, 856 pp.
- Saeki, T. (1971) : 葉温蒸散の数値解析, IBP 発表会.
- 高倉 直, 立花一雄, 杉 二郎 (1968) : 環境計測用データ集録装置, 農業気象, 24, 39—40.
- , (1970) : 農業気象と環境工学, *Ibid.*, 26, 167—172.
- , (1971) : デジタル アナログ シミュレーション *Ibid.*, 27, 23—27.
- , Jordan, K. A. and Boyd, L. L. (1971) : Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *Trans. ASAE*, 15, 964—971.
- , 立花一雄, 古在豊樹, 岡田益己, 千川明, 三原義秋 (1971) : 電子計算機による植物生育のコントロール, (1) 入出力部の設計及び製作, 農業気象全国大会.
- 武智修 (1972) : 野外気温の熱電対線による測温誤差, 農業気象全国大会.
- 東京大学大型計算機センター (1969) : センターニュース, ライブラリー・プログラム.
- Williams, T. J. and Ryan, F. M. (ed.) (1968) : *Progress in Direct Digital Control*. Instrument Society of America, Pittsburgh, 288pp.
- 矢吹万寿 (1971) : 空気力学的手法による群落光合成の測定, IBP 発表会.