

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-365

図形入出力装置を使用した電気回路解析

磯部俊夫

1974年5月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

図形入出力装置を使用した電気回路解析*

磯 部 俊 夫**

Computer Analysis of Linear Electric Circuit with a Storage Tube Graphical Display and Rand Tablet Device

By Toshio ISOBE

This report describes the digital computer program of linear electric circuit analysis for CAD (Computer Aided Design). It is the purpose of this report to show how to process data of CAD programs and to have man-machine communication. It utilizes an on-line computer with a graphic terminal consists of a storage tube graphical display and Rand tablet device. The input to the program is given by drawing the network diagram on the face of the graphical terminal. The output of the program is displayed on the tube.

In this program, the nodal analysis using node elimination method is employed, and a short element to make the description and process of data flexible is suggested.

1. まえがき

設計問題に電子計算機をどのように利用するかという事は、今日の電子計算機利用技術における主要なテーマの一つである。現在の電子計算機的能力および利用技術では電子計算機による設計の完全自動化は、限定された規模の小さな問題以外は無理なようである。設計問題では一般に設計者の過去の経験、知識、創造力等を必要とするもので、このような能力を電子計算機に持たせることは非常に困難である。また一方設計には、多量のデータを処理し、数値計算をしなければならないという面もあり、これらに関しては電子計算機により能率的に処理できる。そこで人間にとって退屈で単純な仕事はできる限り計算機にやらせ、計算機では処理のむずかしい仕事を人間が行うという形で設計を進めるという方式が、現在のところ最も効率の良いものと言われている。一般にこのような方式をCAD(Computer Aided Design)と呼んでいる。CADでは計算機に何をさせ、人間と計算機との間の情報交換をどのような方式で行なうかということが重要な問題点であり興味のある点でもある。

本報告はCADの基本的な概念の把握および技術の習得を目的として作った線型電気回路の定常状態解析のためのプログラムについて述べる。電気回路はその解析方法が古くから研究されており、フィルタ、集積回路等の

高度な設計問題において計算機の利用をよぎなくされてきたということもあり、早くからCAD¹⁾の対象になり研究されてきた。汎用の電気回路解析プログラムは、1962年IBMのトランジスタ回路解析用のTAPが発表され、1965年にはECAPが開発され、以後各種の解析プログラムが作られている。日本でもいくつかの電気回路解析プログラム^{2)~4)}が発表されている。

図形入出力装置を使いオンラインで設計できるものとしては、AEDNET⁵⁾、CIRCAL⁶⁾というシステムが発表されている。これらのシステムは、MITでCADのために開発された特殊な言語を使用して作られたもので、使用している図形入出力装置は、ライトペン付きリフレッシュ・タイプCRTデスクレイ装置である。

本プログラムは、今後日本で広く普及すると思われるストレージ・タイプのCRTを表示装置に、ランド・タブレットを入力装置とした簡易型図形入出力装置を使用し、またAEDNET、CIRCALのようなCAD専用言語を使用せず、一般のフォートラン言語を使用し電気回路図をそのままの形で入力できるものとした。

回路解析は、節点解析法で行なう。ここでは、回路マトリックスを作る前に、不要な節点を消去するという手法を取り入れ全体のマトリックスを小さくしてから計算を行なうという新しい方法を試みた。従来この種のプログラムでは、回路に含まれる節点の数が30とか50とかに制限を受けていたが、本プログラムでは、この方法により

* 昭和49年2月27日受付

** 計算センター(元計測部)

全体の節点数の制限は必要なくなった。

今まで発表されてきた CAD の論文は、主に解析法、回路記述言語等を中心に書かれたものが多く、入力データが実際どのような形で計算機に入り、どのような処理を受け、数値計算可能な形に直されるかについて書かれ

たものはなかった。この報告では、入力データから回路アドミタンス行列を作るまでのデータ処理の過程を図1の回路例により具体的に示し、かつどのようにして入力データを計算機に入力させるかということを中心に述べる。

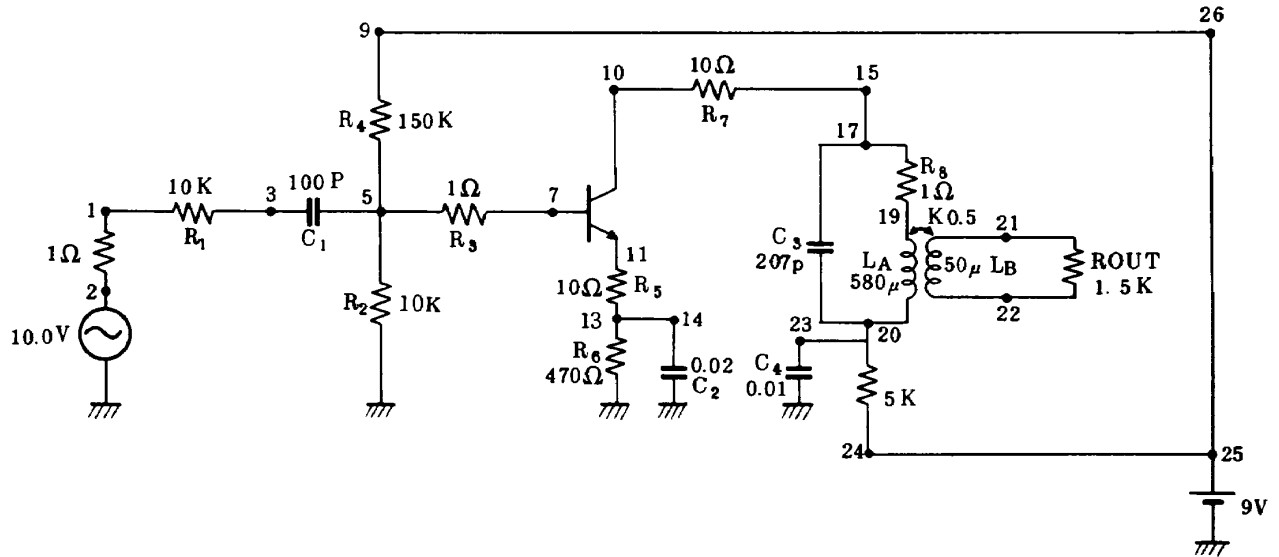
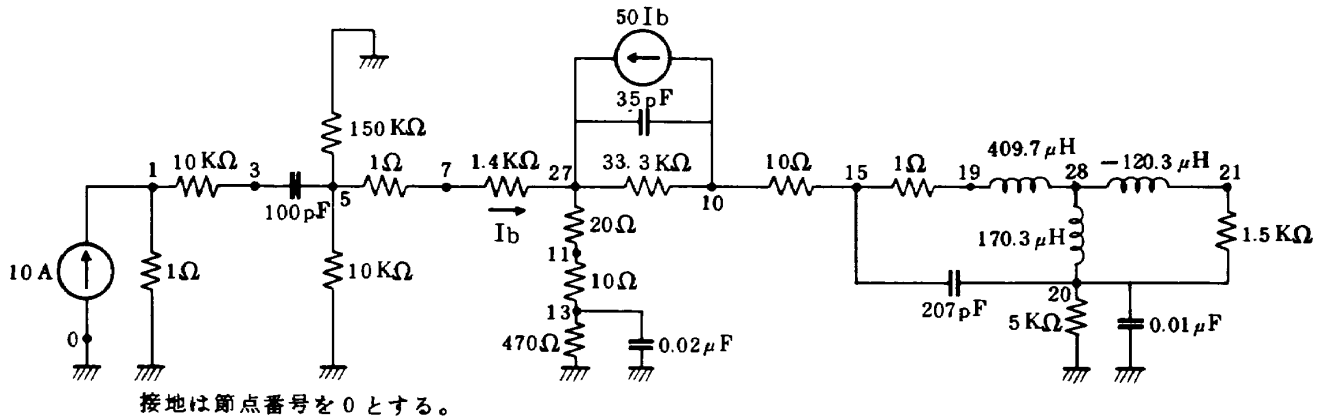
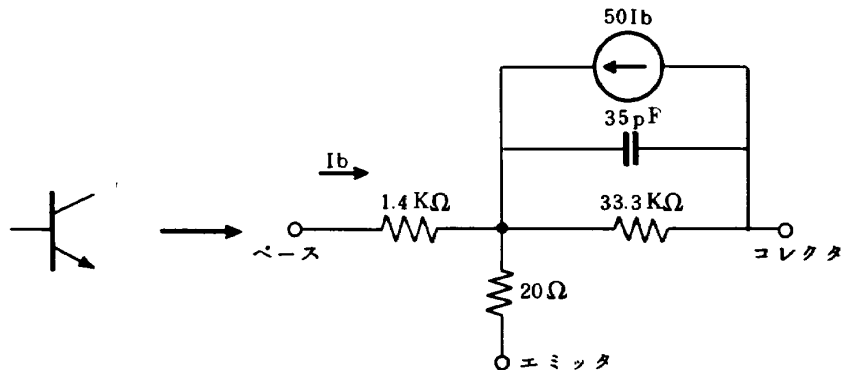


図1 電気回路の一例



(a) 図1の回路の交流解析のための等価回路



(b) トランジスタの等価回路

線型電気回路の定常解は、普通次のような手順で解かれる。ここで図1の回路を具体例として取りあげ、以下の回路により説明する。この回路で使用しているトランジスタの等価回路を図2-bに示すようなものとし、交流解析の場合の等価回路を描くと図2-aのようになる。この回路は14節点からできており、これから回路アドミタンス行列(Y)を作ると表1のような13×13の対称行列になる。この回路を解くことは、(Y)⁻¹を求めるということである。人間が手で解く場合は、13×13の行列の逆行列はそのままの形では到底解けないので、

等価回路の概念を使い、数個の素子をそれと等価な仮の素子に置き換へ全体の回路をなるべく簡単なものにし、手で解ける程度まで回路行列の大きさを小さくして解くという方法をとる。図1のROUTの両端の電圧を求めたいというときは、図2でROUTの接続している節点21、20と電源が接続されている節点0、1、7、10、27以外の節点はこのような考えで消去される。このとき(Y)は6×6の行列となる。表2はこのような操作をした、信号源の周波数が455kHzのときの、図1の回路アドミタンス行列である。

表1 図2-aの回路アドミタンス行列

節点番号	1	3	5	7	27	11	13	10	15	19	28	21	20
1	1.0001	-0.0001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-0.0001	0.0001 +j10 ⁻¹⁶ Ω	-j10 ⁻¹⁶ Ω	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	-j10 ⁻¹⁶ Ω	1.00010667 +j10 ⁻¹⁶ Ω	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	-1	1.00071429	-7.1429×10 ⁻⁴	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	-7.1429×10 ⁻⁴	0.0507432 +j35×10 ⁻¹⁶ Ω	-0.05	0	-3.003×10 ⁻³ +j35×10 ⁻¹⁶ Ω	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	-0.05	0.15	-0.1	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	-0.1	0.102128 +j2×10 ⁻¹⁶ Ω	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	-3.003×10 ⁻³ +j35×10 ⁻¹⁶ Ω	0	0	0.10003003 +j35×10 ⁻¹⁶ Ω	-0.1	0	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	1 +j2.07×10 ⁻¹⁶ Ω	-1	0	-j2.07×10 ⁻¹⁶ Ω	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	j2.4408×10 ⁻¹⁶ Ω	j2.4408×10 ⁻¹⁶ Ω	0	
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j2.4408×10 ⁻¹⁶ Ω	-j1.6625×10 ⁻¹⁶ Ω	j8.3126×10 ⁻¹⁶ Ω	j5.872×10 ⁻¹⁶ Ω
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j8.3126×10 ⁻¹⁶ Ω	6.6667×10 ⁻⁴ -j8.3126×10 ⁻¹⁶ Ω	-6.6667×10 ⁻⁴
20	0	0	0	0	0	0	0	0	-j2.07×10 ⁻¹⁶ Ω	0	j5.872×10 ⁻¹⁶ Ω	-6.6667×10 ⁻⁴ +j1.0207×10 ⁻¹⁶ Ω -j5.872×10 ⁻¹⁶ Ω	8.6667×10 ⁻⁴ +j1.0207×10 ⁻¹⁶ Ω -j5.872×10 ⁻¹⁶ Ω

表2 不要節点を消去した回路アドミタンス行列 (ω = 2π × 455 × 10³)

節点番号	1	7	10	20	21	27
1	1.00008 + j3.11603 × 10 ⁻³	-8.90420 × 10 ⁻³ - j3.1157 × 10 ⁻³	0	0	0	0
7	-8.90420 × 10 ⁻³ - j3.1157 × 10 ⁻³	9.10014 × 10 ⁻⁴ + j3.11537 × 10 ⁻³	0	0	0	-7.14286 × 10 ⁻⁴
10	0	0	3.11275 × 10 ⁻³ - j1.12772 × 10 ⁻⁴	2.91125 × 10 ⁻³ - j1.15701 × 10 ⁻³	-4.0087 × 10 ⁻⁴ + j1.36934 × 10 ⁻³	-3.00300 × 10 ⁻³ - j1.0006 × 10 ⁻⁴
20	0	0	2.91125 × 10 ⁻³ - j1.15701 × 10 ⁻³	8.80373 × 10 ⁻⁴ + j2.17872 × 10 ⁻³	-6.83284 × 10 ⁻⁴ + j7.95835 × 10 ⁻³	0
21	0	0	-4.0087 × 10 ⁻⁴ + j1.36934 × 10 ⁻³	-6.83284 × 10 ⁻⁴ + j7.95835 × 10 ⁻³	6.87293 × 10 ⁻⁴ - j9.32769 × 10 ⁻³	0
27	0	-7.14286 × 10 ⁻⁴	-3.00300 × 10 ⁻³ - j1.0006 × 10 ⁻⁴	0	0	2.53735 × 10 ⁻³ + j1.41346 × 10 ⁻²

本プログラムは、電気回路解析プログラムECNAPと、人間とECNAP間のインターフェース・プログラムから構成されている。インターフェース・プログラムには、入力データを従来どりのカード・リーダーから入力させるための入力ルーチンECSDRDと、簡易型図形入出力装置を使用しオンラインで計算機に回路図そのままを入力できるルーチンINPUTGを用意してある。計算機では、入力された図1のデータを図2と変換し、表2の(Y)を作り、そして(Y)⁻¹を計算し解を求めるという手順で処理される。入力データから(Y)を作り、また求めた解を計算機から出力するという処理は、計算機の数値処理と呼ばれるものであり、(Y)から(Y)⁻¹を求める処理

は、数値計算と呼ばれる処理である。CADでは非数値処理と数値計算処理の両方が含まれることが多い。非数値処理に関する部分はプログラムの使い易さに関係し、数値計算に関する部分はプログラムの精度に関係する。

2. 記号

- C : 容量, 単位F
- E : 複素電圧値, 単位V
- (E) : 電圧ベクトル
- e : 交流瞬時電圧値, 単位V
- f : 周波数, 単位Hz
- I : 複素電流値, 単位A

- (I) : 電流ベクトル
- I_{mag} : 複素数の虚数部
- i : 交流瞬時電流値, 単位 A
- j : $\sqrt{-1}$
- K : 結合係数 = $M/\sqrt{L_1 L_2}$
- L : 自己インダクタンス, 単位 H
- M : 相互インダクタンス, 単位 H
- R : 抵抗, 単位 Ω
- t : 時間, 単位秒
- Y : アドミタンス, 単位 H
- (Y) : アドミタンス行列
- Z : インピーダンス, 単位 Ω
- θ : 位相角, 単位度あるいは Rad.
- ω : 角速度, 単位 Rad./秒

は 32 の出力指定で得られる電流値によって制御される。

表 3 図 1 の回路の ECNAP 用入力データ

要素番号	要素の種類	N 1	N 2	要素値
R, C, L TABLE				
1	1	2	1	0.100000E+01
2	1	1	3	0.100000E+05
3	3	3	5	0.999999E-10
4	1	5	0	0.100000E+05
5	1	5	7	0.100000E+01
6	1	5	9	0.150000E+06
7	1	11	13	0.100000E+02
8	1	13	0	0.470000E+03
9	3	14	0	0.207000E-07
10	1	10	15	0.100000E+02
11	3	17	20	0.200000E-09
12	1	17	19	0.100000E+01
13	2	19	20	0.580000E-03
14	1	20	24	0.500000E+04
15	3	23	0	0.100000E-07
16	2	21	22	0.500000E-04
17	1	21	22	0.150000E+04
18	1	27	30	0.140000E+04
19	1	30	29	0.200000E+02
20	1	30	28	0.333000E+05
21	3	30	28	0.350000E-10
MUTUAL TABLE				
22	12	13	16	0.500000E+00
D TABLE				
29	5	25	0	0.900000E+01
A TABLE				
30	7	2	0	0.999999E-01
T TABLE				
31	9	30	28	0.500000E+02
OUT PUT TABLE				
32	1	27	30	0.140000E+04
33	1	21	22	0.150000E+04
34	1	21	22	0.100000E+01
SHORT TABLE				
	15		17	
	9		26	
	26		25	
	24		25	
	13		14	
	20		23	
	7		27	
	10		28	
	11		29	

3. 電気回路解析プログラム ECNAP

ECNAP (Electric Circuit Nodal Analysis Program) は, ある特定の周波数 f に対して ECNAP 用入力データから Y マトリックスと電流源ベクトルを作り, (Y) の逆マトリックス (Y)⁻¹ を計算し, 所定の節点間電圧あるいは素子に流れる電流値を求めるためのプログラムである。

このプログラムで使用可能な電気回路構成要素は,

1) 抵抗, 2) インダクタンス, 3) 容量, 4) 相互インダクタンス, 5) 直流電流源, 6) 直流電圧源, 7) 交流電流源, 8) 交流電圧源, 9) 従属電流源, 10) 短絡素子の 10 種である。短絡素子とは, 二つの節点間を短絡する素子をいう。さらに出力指定データを加えた 11 種類のデータで ECNAP 用入力データが作られる。短絡素子を除いた 10 種類のデータは,

要素番号, 要素の種類, N1, N2, 要素の値という形式で表現する。N は要素が相互インダクタンス以外のときは, 要素の両端の節点番号, 相互インダクタンスのときは, 相互インダクタンスで結ばれている二つのインダクタンスの要素番号になる。出力値としては節点 N1 - N2 間の電圧を要素の値で割ったものを求める。すなわち節点 N1 - N2 間に接続されている素子に流れる電流値が求まる。要素の値を 1 にしておくと N1 - N2 の電圧値が求まる。

短絡素子は

N 1, N 2

という形式で表現する。

図 1 の回路を ECNAP 入力データに変換したものを表 3 に示す。素子番号 22 のデータは相互インダクタンス, 29 は直流電源, 30 は交流電源, 31 は従属電源でこれ

3.1 交流解析と直流解析

ECNAPでは、周波数パラメータ f の値が0のとき直流解析を行ない、0以外のとき交流解析を行なう。交流解析のときは、直流電流源が取り除かれ直流電圧源は、短絡素子として取扱われる。直流解析のときは、交流電流源、キャパシタンスが取り除かれ、交流電圧源、インダクタンスは短絡素子として取り扱われる。相互インダクタンスは無視する。

3.2 相互インダクタンスの処理

インダクタンス L_1, L_2 間に相互インダクタンス M が存在する図3-aのような回路の等価回路は、図3-bのようになる。さらに $Y-\Delta$ 変換*を行なうことにより図3-cのように書き換えられる。すなわち節点1-2に L'_1 、節点3-4に L'_2 、節点1-3に L_3 を付け節点2-4を短絡する。ここで L'_1, L'_2, L_3 は

$$L'_1 = \frac{(L_1 - M)(L_2 - M) + M\{(L_1 - M) + (L_2 - M)\}}{L_2 - M}$$

$$L'_2 = \frac{(L_1 - M)(L_2 - M) + M\{(L_1 - M) + (L_2 - M)\}}{L_1 - M}$$

$$L_3 = \frac{(L_1 - M)(L_2 - M) + M\{(L_1 - M) + (L_2 - M)\}}{M}$$

である。

表4は、表3のデータで要素番号22の相互インダクタンスの処理を行なった結果である。要素番号13, 16, 22のデータが処理され、節点20-22が短絡された。

3.3 アドミタンス化

相互インダクタンスの処理を終った回路データでは、受動素子は抵抗 R 、インダクタンス L 、容量 C の3要素になる。 R, C, L をアドミタンスの形に変換すると抵抗、インダクタンス、容量は同一量となり、これらの区別をする必要がなくなる。 R, L, C のそれぞれのアドミタンス Y_R, Y_L, Y_C は

$$Y_R = 1/R$$

$$Y_L = -j/2\pi f L$$

$$Y_C = j 2\pi f C$$

表4 相互インダクタンス処理後のデータ

要素番号	要素の種類	N 1	N 2	要素値
R, C, L TABLE				
1	1	2	1	0.1000000E+01
2	1	1	3	0.1000000E+05
3	3	3	5	0.9999999E-10
4	1	5	0	0.1000000E+05
5	1	5	7	0.1000000E+01
6	1	5	9	0.1500000E+06
7	1	11	13	0.1000000E+02
8	1	13	0	0.4700000E+03
9	3	14	0	0.2000000E-07
10	1	10	15	0.1000000E+02
11	3	17	20	0.2070000E-09
12	1	17	19	0.1000000E+01
13	2	19	21	0.2554408E-03
14	1	20	24	0.5000000E+04
15	3	23	0	0.1000000E-07
16	2	21	20	0.4395244E-04
17	1	21	22	0.1500000E+04
18	1	27	30	0.1400000E+04
19	1	30	29	0.2000000E+02
20	1	30	28	0.3330000E+05
21	3	30	28	0.3500000E-10
22	2	19	20	-0.6188309E-03

D TABLE

29	5	25	0	0.9000000E+01
----	---	----	---	---------------

A TABLE

30	7	2	0	0.9999999E-01
----	---	---	---	---------------

T TABLE

31	9	30	28	0.5000000E+02
----	---	----	----	---------------

OUT PUT TABLE

32	1	27	30	0.1400000E+04
33	1	21	22	0.1500000E+04
34	1	21	22	0.1000000E+01

SHORT TABLE

15	17
9	26
26	25
24	25
13	14
20	23
7	27
10	28
11	29
20	22

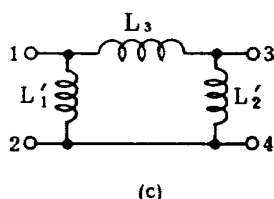
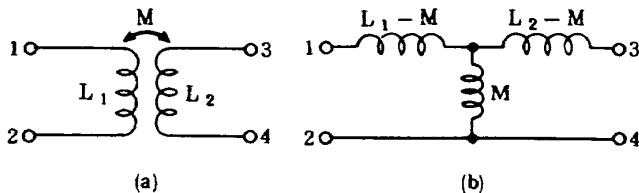


図3 相互インダクタンスの等価回路

* 3.8 参照

となる。直流解析の場合はインダクタンスは短絡素子と までのデータを $f = 455 \text{ kHz}$ でアドミタンス化したもの
し、容量は取り除く、表 5 は表 4 の要素番号 1 から 22 である。データは複素数表示となる。

表 5 アドミタンス化されたデータ

要素番号	N 1	N 2	アドミタンス値 (複素数)	
			(実数部)	(虚数部)
1	2	1	0.1000000E+01	0.0000000E-40
2	1	3	0.1000000E-03	0.0000000E-40
3	3	5	0.0000000E-40	0.2858849E-03
4	5	0	0.1000000E-03	0.0000000E-40
5	5	7	0.1000000E+01	0.0000000E-40
6	5	9	0.6666667E-05	0.0000000E-40
7	11	13	0.9999999E-01	0.0000000E-40
8	13	0	0.2127660E-02	0.0000000E-40
9	14	0	0.0000000E-40	0.5717698E-01
10	10	15	0.9999999E-01	0.0000000E-40
11	17	20	0.0000000E-40	0.5917818E-03
12	17	19	0.1000000E+01	0.0000000E-40
13	19	21	0.0000000E-40	-0.1369362E-02
14	20	24	0.2000000E-03	0.0000000E-40
15	23	0	0.0000000E-40	0.2858849E-01
16	21	20	0.0000000E-40	-0.7958399E-02
17	21	22	0.6666667E-03	0.0000000E-40
18	27	30	0.7142858E-03	0.0000000E-40
19	30	29	0.5000000E-01	0.0000000E-40
20	30	28	0.3003003E-04	0.0000007E-40
21	30	28	0.0000000E-40	0.1000597E-03
22	19	20	0.0000000E-40	0.5652450E-03

表 6 短絡処理されたデータ

要素番号		N 1	N 2	アドミタンス値	
SHORT	TABLE	1	2	0.1000000E+01	0.0000000E-40
		2	3	0.1000000E-03	0.0000000E-40
15	17	3	5	0.0000000E-40	0.2858849E-03
9	26	4	5	0.1000000E-03	0.0000000E-40
26	25	5	7	0.1000000E+01	0.0000000E-40
24	25	6	5	0.6666667E-05	0.0000000E-40
13	14	7	11	0.9999999E-01	0.0000000E-40
20	23	8	0	0.2127660E-02	0.0000000E-40
7	27	9	0	0.0000000E-40	0.5717698E-01
10	28	10	10	0.9999999E-01	0.0000000E-40
11	29	11	15	0.0000000E-40	0.5917818E-03
20	22	12	15	0.1000000E-01	0.0000000E-40
25	0	13	19	0.0000000E-40	-0.1369362E-02
		14	0	0.2000000E-03	0.0000000E-40
(a)		15	0	0.0000000E-40	0.2858849E-01
		16	20	0.0000000E-40	-0.7958399E-02
		17	20	0.6666667E-03	0.0000000E-40
		18	7	0.7142858E-03	0.0000000E-40
		19	11	0.5000000E-01	0.0000000E-40
		20	10	0.3003003E-04	0.0000000E-40
		21	10	0.0000000E-40	0.1000597E-03
		22	19	0.0000000E-40	0.5652450E-03

(b)

3.4 短絡素子の処理

短絡素子は入力データとしてECNAPに入ってくるほかに、ECNAP内においても直流解析における交流電圧源、アドミタンス化でのインダクタンスの処理、交流解析における直流電圧源の処理、相互インダクタンスの処理でも発生する。二つの節点間が短絡素子で結ばれているということは、電氣的に等しい点が二つの異なる節点名を持っているということである。したがって、短絡素子で結ばれている二つの節点名のいずれかは消去する必要がある。ここでは大きい節点番号のものが消去され、

小さい節点番号に統一する。表6-aの短絡素子データにより、表5のデータを処理した結果を表6-bに示す。

3.5 並列接続の処理

並列接続されたアドミタンス Y_1, Y_2, \dots, Y_n の合成アドミタンス Y は

$$Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n$$

である。そこで等しい節点番号をもつアドミタンスは一つにまとめることができる。表7は表6-bのデータを並列接続処理した結果である。これにより要素番号6, 9, 15, 17, 21の素子が処理された。

表7 並列接続処理されたデータ

要素番号	N 1	N 2	アドミタンス値	
1	1	2	0.1000000 E+01	0.0000000 E-40
2	1	3	0.1000000 E-03	0.0000000 E-40
3	3	5	0.0000000 E-40	0.2858849 E-03
4	0	5	0.1066667 E-03	0.0000000 E-40
5	5	7	0.1000000 E+01	0.0000000 E-40
6	0	0	0.6666667 E-05	0.0000000 E-40
7	11	13	0.9999999 E-01	0.0000000 E-40
8	0	13	0.2127660 E-02	0.5717698 E-01
9	0	0	0.0000000 E-40	0.5717698 E-01
10	10	15	0.9999999 E-01	0.0000000 E-40
11	15	20	0.0000000 E-40	0.5917818 E-03
12	15	19	0.1000000 E+01	0.0000000 E-40
13	19	21	0.0000000 E-40	-0.1369362 E-02
14	0	20	0.2000000 E-03	0.2858849 E-01
15	0	0	0.0000000 E-40	0.2858849 E-01
16	20	21	0.6666667 E-03	-0.7958399 E-02
17	0	0	0.6666667 E-03	0.0000000 E-40
18	7	30	0.7142858 E-03	0.0000000 E-40
19	11	30	0.5000000 E-01	0.0000000 E-40
20	10	30	0.3003003 E-04	0.1000597 E-03
21	0	0	0.0000000 E-40	0.1000597 E-03
22	19	20	0.0000000 E-40	0.5652450 E-03

3.6 電源の処理

節点解析での電源は電流源である。したがって電圧源は電流源に変換する必要がある。電圧源-電流源の等価変換は図4-aのようになる。ここで変換後の電流源の電流の大きさは

$$I = E / R$$

である。図4-bのように電圧源に並列に接続されてい

る素子は回路に何らの影響をも与えないので取り除く。一つの電圧源に N 個の素子が接続されているときは N 個の電流源に変換される。表8は電源処理を行なった結果である。要素番号23が電流源であり要素番号1は電流源に並列に接続されている。

3.7 開放端をもつ素子の処理

素子の一端が開放されている素子には、電流は流れな

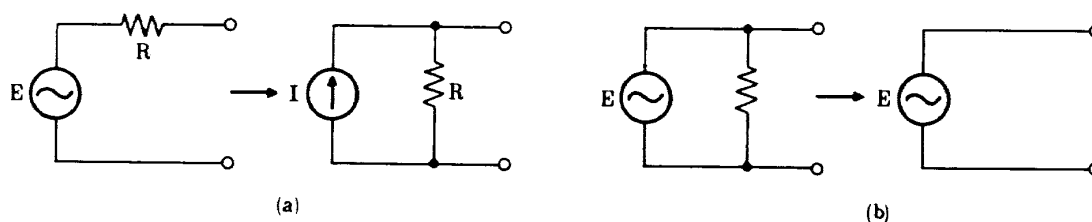


図4 電源の等価回路

表 8 電源処理されたデータ

要素番号	N 1	N 2	アドミタンス値	
1	0	1	0.1000000 E+01	0.0000000 E-40
2	1	3	0.1000000 E-03	0.0000000 E-40
3	3	5	0.0000000 E-40	0.2858849 E-03
4	0	5	0.1066667 E-03	0.0000000 E-40
5	5	7	0.1000000 E+01	0.0000000 E-40
6	0	0	0.6666667 E-05	0.0000000 E-40
7	11	13	0.9999999 E-01	0.0000000 E-40
8	0	13	0.2127660 E-02	0.5717698 E-01
9	0	0	0.0000000 E-40	0.5717698 E-01
10	10	15	0.9999999 E-01	0.0000000 E-40
11	15	20	0.0000000 E-40	0.5917818 E-03
12	15	19	0.1000000 E+01	0.0000000 E-40
13	19	21	0.0000000 E-40	-0.1369362 E-02
14	0	20	0.2000000 E-03	0.2858849 E-01
15	0	0	0.0000000 E-40	0.2858849 E-01
16	20	21	0.6666667 E-03	-0.7958399 E-02
17	0	0	0.6666667 E-03	0.0000000 E-40
18	7	30	0.7142858 E-03	0.0000000 E-40
19	11	30	0.5000000 E-01	0.0000000 E-40
20	10	30	0.3003003 E-04	0.1000597 E-03
21	0	0	0.0000000 E-40	0.1000597 E-03
22	19	20	0.0000000 E-40	0.5652450 E-03
23	1	0	0.9999999 E-01	0.0000000 E-40

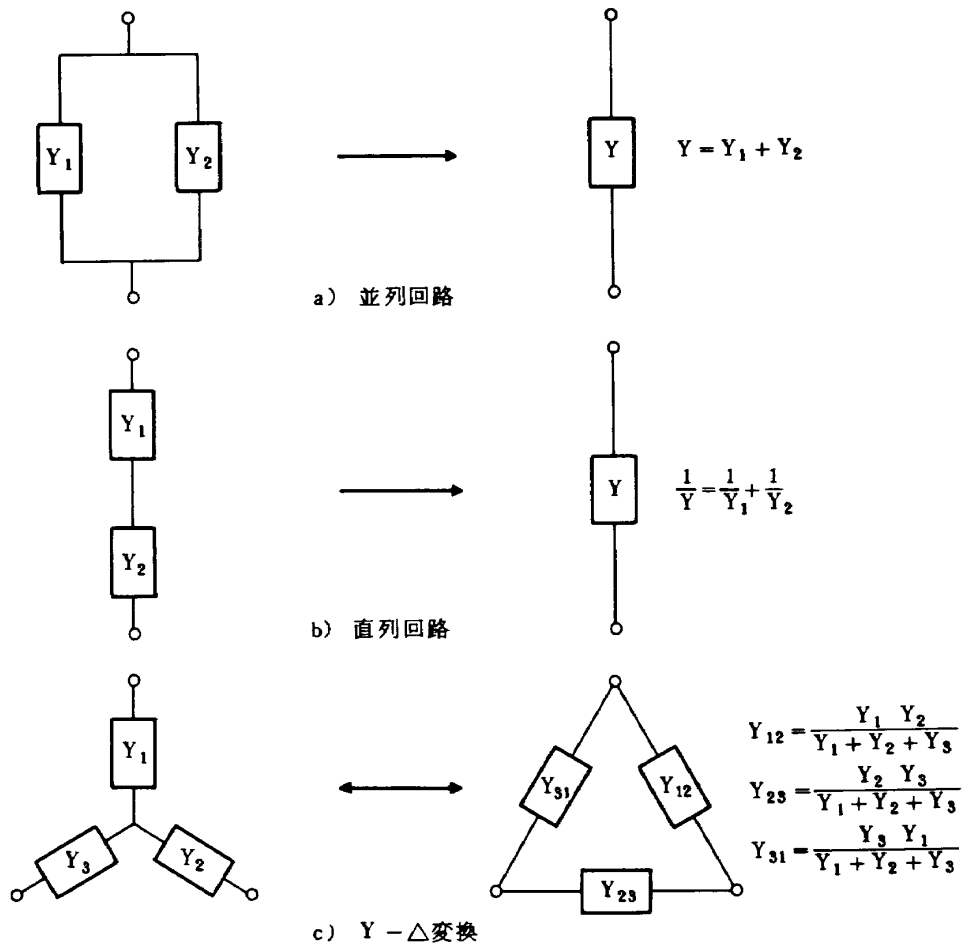


図 5 一般に使われている等価変換

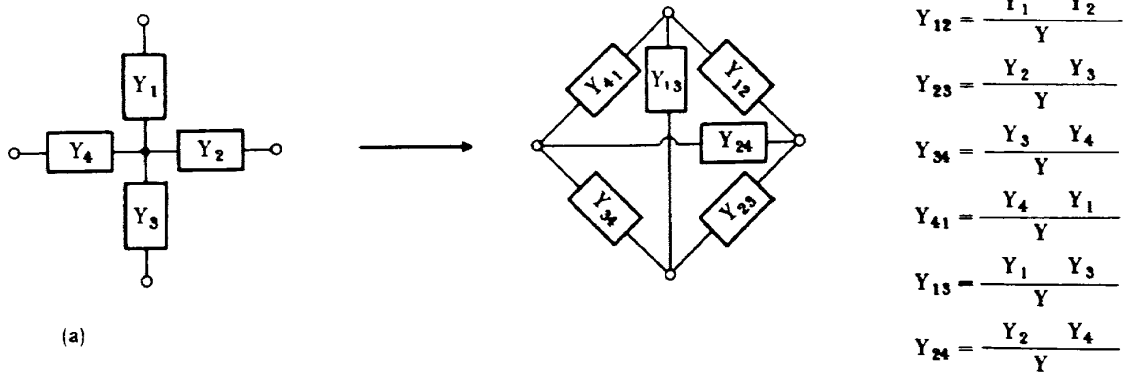
い。このような素子は回路から取り除いても回路には何らの影響をも与えない。したがって開放端をもつ素子は回路から取り除く。

3.8 不要節点の消去

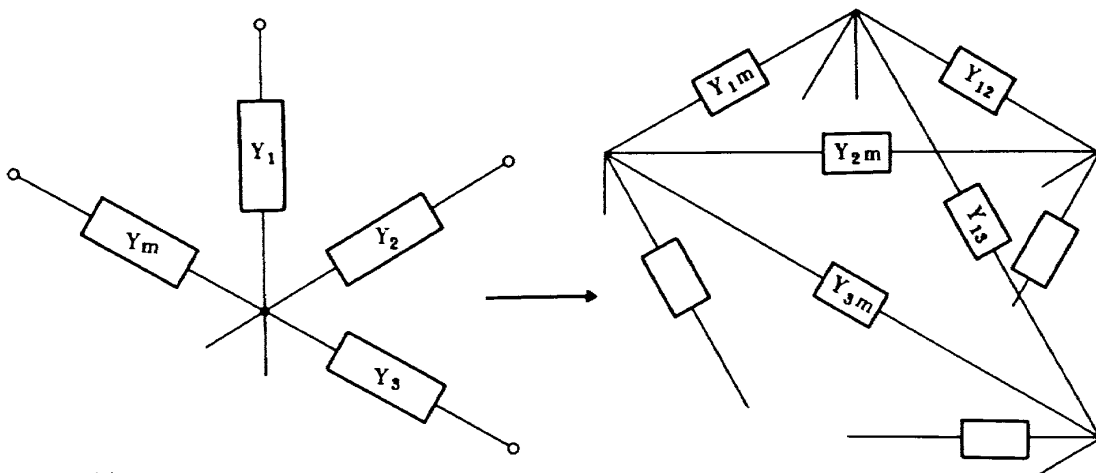
電気回路では節点の数が非常に多くなることがある。節点解析では、解を求めるためにYマトリックスの逆マトリックスを計算しなくてはならない。逆マトリックスの計算では、計算時間と必要とするエリアはマトリックスの大きさの二乗で増大する。実際の回路計算では、電源から電流が流れ込む節点および解を求めようとする節点以外の節点はいわば不必要な節点であり、消去できるものであれば消去した方がよい。電流の流れ込む節点の数を N_I 、出力端子として必要な節点の数を N_0 とすれば、この回路で必要とする節点数 N は $N = N_I + N_0$ である。したがって不必要な節点を消去することができれば

マトリックスの大きさは $(N_I + N_0 - 1)$ 次となる。

通常人間が電気回路を解くときは等価回路という概念でこのような操作を行ないながら計算してゆく。人間は一般には閉路解析で計算するので、節点を減らすというより枝路数を減らすということで行なうが、本質的には同じことである。良く使われる等価変換を図5に示す。直列回路の等価変換では、素子、節点がそれぞれ1つ減少、Y- Δ 変換では、素子の数は同じであるが節点の数が1つ減少している。消去した節点に、直列回路では2つの素子が、Y結線では3つの素子が接続されていた。1つの節点に4つの素子が接続されているときは図6-aの等価変換が成り立つ。一般に M 個の素子が接続されている節点を消去すると図6-bのようになる。変換後は節点が1つ減少し、素子数は M 個から $\sum_{k=1}^{M-1} k$ 個となる。^{*} 不必要な全節点は、この方法で消去できる。表8



ただし $Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4$



$$Y_{kl} = \frac{Y_k Y_l}{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_m} \quad (k \neq l)$$

図6 Y- Δ 変換の一般化した等価回路

* 付録2参照

のデータにこの操作を行った結果を表9に示す。図7は表9を回路図形式にして示したものである。

3.9 アドミタンス行列(Y)の作成

上記までの処理を行なったデータは、アドミタンスデータと電流源データに変換されている。無秩序に付けられている節点番号は0, 1, ……N と付け直す。アドミタンス行列(Y)はN×Nの対称マトリックスになる。節点番号N₁ N₂ をもったアドミタンスyをy_{n₁, n₂} (n₁ < n₂) とかくと(Y)の要素は

$$Y_{n_1, n_2} = Y_{n_2, n_1} = -y_{n_1, n_2} \quad (n_1 \neq n_2, n_1, n_2 \neq 0)$$

$$Y_{n, n} = \sum_{k=1}^n y_{n, k}$$

となる。同様にして電流源ベクトル(I)も得られる。

3.10 計 算

各節点における電圧値のベクトルを(E)とすると

$$(I) = (Y)(E)$$

の関係が成り立つ。

問題は(E)を求めることである。(E)は

$$(E) = (Y)^{-1} (I)$$

である。(I)に従属電流源I_tが含まれているときは

$$(I) = (I_0) + (I_t)$$

(I_t)は(E)によって定まるもので

$$(I_t) = (B)(E)$$

と書くことができる。したがって

$$(I) = (I_0) + (B)(E)$$

$$= (Y)(E)$$

表9 不要節点を消去したデータ

要素番号	N 1	N 2	アドミタンス値	
1	0	1	0. 1000000E+01	0. 3323411E-08
2	0	0	0. 1000000E-03	0. 0000000E-40
3	0	0	0. 8909845E-04	0. 3116585E-04
4	0	7	0. 1066458E-03	-0. 3323057E-08
5	1	7	0. 8908198E-04	0. 3115697E-04
6	0	0	0. 6666667E-05	0. 0000000E-40
7	0	0	0. 9999999E-01	0. 0000000E-40
8	0	0	0. 2127660E-02	0. 5717698E-01
9	0	0	0. 0000000E-40	0. 5717698E-01
10	0	0	0. 9999999E-01	0. 0000000E-40
11	0	0	0. 9090906E-01	-0. 4890758E-04
12	10	20	-0. 2911248E-05	0. 1157013E-02
13	0	0	0. 0000000E-40	-0. 1369362E-02
14	0	20	0. 2000000E-03	0. 2858849E-01
15	0	0	0. 0000000E-40	0. 2858849E-01
16	20	21	0. 6832844E-03	-0. 7958345E-02
17	0	0	0. 6666667E-03	0. 0000000E-40
18	7	30	0. 7142858E-03	0. 0000000E-40
19	0	30	0. 2462915E-01	0. 1403453E-01
20	10	30	0. 3003003E-04	0. 1000597E-03
21	0	0	0. 0000000E-40	0. 1000597E-03
22	10	21	0. 4008698E-05	-0. 1369344E-02

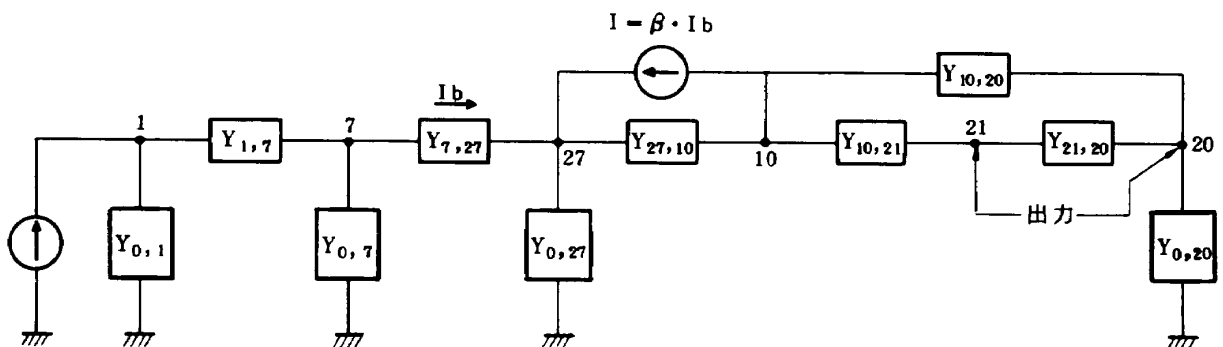


図7 表9を回路図形式で表現

よって

$$(E) = \frac{(I_0)}{(Y) - (B)}$$

となる。

節点 N_1, N_2 間の電圧 E_{n_1, n_2} は

$$E_{n_1, n_2} = E_{n_1} - E_{n_2}$$

y_{n_1, n_2} の素子に流れる電流 $I_{y_{n_1, n_2}}$ は

$$I_{y_{n_1, n_2}} = (E_{n_1} - E_{n_2}) \cdot y_{n_1, n_2}$$

である。

表 10 に (Y), (B) を示す。各行列の添字 1, 2, ... 6 は図 1 の節点 1, 7, 10, 20, 21, 30 に対応する。表 11 に各節点の電圧解を示す。

4. 入出力形式

CAD プログラムでは、モデルをどのような形式で計

算機に入力するかは重要である。ECNAP プログラムでは、バッチ用のデータ・カードにより入力するルーチン ECSDRD と蓄積型 CRT とランド・タブレットを組み合わせた図形入出力装置を使用し、オンラインで計算機と情報交換ができる入出力ルーチン INPUTG を用意した。これら二つのルーチンは、それぞれの入力データを解釈し ECNAP 用入力データに変換し、ECNAP コモン・データ・エリアに書き込むものである。

4.1 バッチ用データ入力ルーチン ECSDRD

多くの電気回路シミュレーション・プログラムは、言語という形式で作られている。言語形式で作られていると、その言語の仕様を知るだけで、そのほかの計算機に関する知識を一切知らなくても電気回路シミュレーションが行なわれ、形式的にも統一のとれたものができる

表 10 (Y) および (B)

I	J	Y(I, J)		B(I, J)	
1	1	(0.10000891 E+01,	0.31160298 E-04)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
1	2	(-0.89081979 E-04,	-0.31156975 E-04)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
1	3	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
1	4	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
1	5	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
1	6	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
2	1	(-0.89081979 E-04,	-0.31156975 E-04)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
2	2	(0.91001354 E-03,	0.31153652 E-04)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
2	3	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
2	4	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
2	5	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
2	6	(-0.71428576 E-03,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
3	1	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
3	2	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(-0.35714291 E-01,	0.00000000 E-40)
3	3	(0.31127481 E-04,	-0.11227181 E-03)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
3	4	(0.29112475 E-05,	-0.11570128 E-02)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
3	5	(-0.40086979 E-05,	0.13693443 E-02)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
3	6	(-0.30030031 E-04,	-0.10005973 E-03)	(0.35714291 E-01,	0.00000000 E-40)
4	1	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
4	2	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
4	3	(0.29112475 E-05,	-0.11570128 E-02)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
4	4	(0.88037313 E-03,	0.21787160 E-01)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
4	5	(-0.68328436 E-03,	0.79583451 E-02)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
4	6	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
5	1	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
5	2	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
5	3	(-0.40086979 E-05,	0.13693443 E-02)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
5	4	(-0.68328436 E-03,	0.79583451 E-02)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
5	5	(0.68729306 E-03,	-0.93276894 E-02)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
5	6	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
6	1	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
6	2	(-0.71428576 E-03,	0.00000000 E-40)	(0.35714291 E-01,	0.00000000 E-40)
6	3	(-0.30030031 E-04,	-0.10005973 E-03)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
6	4	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
6	5	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)	(0.00000000 E-40,	0.00000000 E-40)
6	6	(0.25373469 E-01,	0.14134588 E-01)	(0.35714291 E-01,	0.00000000 E-40)

表 11 各節点の電圧解

節 点	複 素 電 圧
1	(9.99919×10^{-2} , -2.72168×10^{-6})
7	(9.24966×10^{-3} , 1.18612×10^{-3})
10	(-2.81817 , 2.62667)
20	(2.55863×10^{-3} , 3.33630×10^{-3})
21	(-3.82256×10^{-1} , 4.13036×10^{-1})
30	(-7.38077×10^{-4} , -2.44672×10^{-3})

いう特徴がある。その反面、その言語仕様によって適用範囲が限定されてしまうという欠点が生ずる。また言語形式にすると回路記述文、解析条件文、出力指定文、制御文等を備えなくてはならず、汎用のものを作ろうとすると非常に大きなプログラムになり、プログラム製作に多くの労力と時間を必要とする。そこで使用上多少の不便はあるが、融通性に富み、かつプログラムも作りやすくするという目的で、バッチ用の入力プログラム ECS DRDは、フォートランのサブルーチンという形式にした。したがってECS DRDで扱うデータは、回路記述文と出力指定だけとした。出力で求められる量も任意の二点間の電位と任意の素子に流れる電流の二つにした。一般に電気回路では電位と電流の二つが分かれば、他の量はこれから計算できる。データは、フォートラインプログラムのデータという形で書く。ECS DRDがCALLされた時点で、ECS DRDからREAD命令がだされデータが読み込まれる。

データの形式は次のようなものである。

回路構成素子定義文

回路構成素子定義文は短絡素子、四端子ポート定義文以外は

$$\text{素子名}(N_1, N_2) = \text{素子値} V$$

という形式をとる。これは節点 N_1 , N_2 に素子名で定義された素子が接続されているという意味である。そしてその素子の値が V であることを示している。回路構成素子定義文で定義できる素子は、抵抗、インダクタンス、容量、直流電圧源、直流電流源、交流電圧源、交流電流源、従属電流源、相互インダクタンス、短絡素子および四端子ポートである。素子名はそれぞれの素子の種類を指定するための記号で始まり、以下素子を識別する記号を付けた5文字以内の記号で表現される。特に他の素子と識別する必要のないものは、識別記号を付ける必要はない。相互インダクタンス定義のときは、 N_1 , N_2 は相互誘導作用を有する二つのインダクタンス名を書く。交流電源では、その値は電源波形の振幅と位相を(振幅、

位相)という形で表現する。位相はラジアンで表わす。位相が0のときは省略しても良い。電圧源では N_1 の節点が正、 N_2 の節点が負の極性をもち、電流源では N_1 から電流が流れ出てゆき N_2 へ戻ってくる。従属電流源の電流値は

$$V * \text{素子名}$$

で表わされる。これは、素子名で示された素子に流れている電流の V 倍の値をとるということである。

相互インダクタンスは M 形式と K 形式を用意した。 M 形式は、相互インダクタンス M をそのまま定義するものであり、 K 形式は結合係数 k で定義するものである。 k と M とは次の関係がある。

$$k = M / \sqrt{L_1 L_2} < 1$$

短絡素子は、二つの節点 N_1 , N_2 が電氣的に等しいことを示すもので

$$\text{SHORT} = N_1, N_2$$

の形式で書く。

四端子ポート定義文は

$$\text{PORT}(N_1, N_2, N_3, N_4) = \text{ポート名}$$

という形式で書く。節点 N_1 , N_2 , N_3 , N_4 にポート名の四端子が接続されていることを示す。四端子はPORT定義文で定義される。

出力指定文

出力指定文は、電圧指定と電流指定の二つである。電圧指定は、求めようとする任意の節点 N_1 , N_2 間を指定する。形式は

$$E = N_1, N_2$$

である。電流指定の形式は

$$I = \text{素子名}$$

である。素子名に書かれた素子に流れる電流が求められる。素子名は、他の素子と識別できるように識別記号を付けられたものでなければならない。ここで指定できる素子は R , C , L である。 L は相互インダクタンスをもっていないものに限る。

PORT定義文

四端子ポートの定義をするもので

$$\text{ポート名} = N_{p1}, N_{p2}, N_{p3}, N_{p4}$$

の形式で書く。ポート名は、四端子定義文のポート名と一致していなくてはならないが、 N_{p1} , N_{p2} , N_{p3} , N_{p4} は、 N_1 , N_2 , N_3 , N_4 と対応していれば良い。四端子の定義は、回路構成素子定義文を使って書く。ここでは短絡素子は使えない。

PEND文

四端子の定義の終りを示す。PORT定義文には必ずPEND文を付けなければならない。

コメント文

コメント文はカードの1カラム目がCで始まるもので、カードに書かれているものが印字されるだけである。

END文

データの終りはENDで示す。ENDを読み込むと、それまでに読んだデータを解釈し、データ変換を行ない、メインプログラムに戻る。

表12は使用可能な文を表にしたものである。各文は、コメント文を除いて、データ・カードの2カラム目以降ならばどこから書きだしても良い。ブランクは仕切り記号とみなす。

図1の回路をECSDDRDルーチンのデータ形式で書いたものが図8である。トランジスタは図2-bの等価回路であらわされるものとして、TRという名前の四端子網で表現した。

4.2 図形入出力装置による入出力ルーチンINPUTG

これは図形入出力装置を使って、オンラインで計算機と情報交換を行ないながら電気回路解析を行なうルーチンINPUTGである。ここで使う図形入出力装置は、出力として蓄積型CRTと制御盤に取り付けた4つのランプ(以後LAMPと呼び、各ランプの点灯の状態を0~15の数字で示す)、入力としてランド・タブレットとテン-

キーを持ったものである。CRTは有効面積5×5インチのもの、入力タブレットは10×10インチで面上は1024(=2¹⁰)×1024の格子点で分割され、スタイラス・ペンを使って面上の任意の位置が計算機に入力できるものであり、タブレット面とCRTの図面が一对一に対応している。テンキーは0~9の数字および3種類の記号が入力できる。これらの入出力装置は、フォートランのサブルーチン形式で作られたプログラムGRFSUBで制御される。

このプログラムは、最初に図9のパターンがCRTにあらわれる。パターンの右側には、INPUTGで使用できる素子13個のシンボルと、その左に素子指定スイッチ点および計算開始指定スイッチ点の14点、パターンの上側には回路計算指定スイッチ9点、そして中央に121個の格子点があられる。格子点は節点に相当し、素子は格子点間に接続される。このルーチンで指定できる素子は、抵抗、コンデンサ、コイル、相互インダクタンス、トランジスタ、交流電流源、交流電圧源、直流電圧源、短絡素子、ターミナル、および接地である。回路は次のようにして定義される。

(1) 素子スイッチ点に相当するタブレットの位置にスタイラス・ペンを持ってゆき入力する。素子がターミナ

表12 データ形式

文	形 式	単 位
抵 抗	$R - (N1, N2) = V$	Ω
インダクタンス	$L - (N1, N2) = V$	H
容 量	$C - (N1, N2) = V$	F
直 流 電 圧 源	$D - (N1, N2) = V$	V
直 流 電 流 源	$DI - (N1, N2) = V$	A
交 流 電 圧 源	$A - (N1, N2) = (V1, V2)$	V
交 流 電 流 源	$AI - (N1, N2) = (V1, V2)$	A
従 属 電 流 源	$T - (N1, N2) = (V1, V2) * \text{素子名}$	A
相 互 インダクタンス	$M - (\text{インダクタンス名}, \text{インダクタンス名}) = V$	H
	$K - (\text{インダクタンス名}, \text{インダクタンス名}) = V$	
短 絡	$SHORT = N1, N2$	
四 端 子 ポ ー ト	$PORT (N1, N2, N3, N4) = \text{名前}$	
出 力 指 定 電 圧	$E = N1, N2$	
出 力 指 定 電 流	$I = \text{素子名}$	
四 端 子 ポ ー ト 定 義 開 始	$\text{名前} = N1', N2', N3', N4$	
四 端 子 ポ ー ト 定 義 終 了	PEND	
コ メ ン ト	第1カラム目にC	
デ ー タ 終 了	END	

C EXAMPLE

```

A(2,0)=0.1
R(2,1)=1.0
R1(1,3)=10E3
C1(3,5)=100E-12
R2(5,0)=10E3
R3(5,7)=1.0
R4(5,9)=150.0E3
R5(11,13)=10
R6(13,6)=470.0
C2(14,0)=0.02E-6
R7(10,15)=10
SHORT=15,17
C3(17,20)=207E-12
R8(17,19)=1
LA(19,20)=580E-6
R10(20,24)=5E3
C4(23,0)=0.01E-6
LB(21,22)=50E-6
K(LA, LB)=0.5
ROUT(21,22)=1.5E3
D(25,0)=9
SHORT=9.26
SHORT=26,25
SHORT=24,25
SHORT=13,14
SHORT=20,23
PORT(7,10,11,0)=TR
TR=1,2,3,0
RT(1,4)=1.4E3
R(4,3)=20
R(4,2)=33.3E3
C(4,2)=35E-12
T(4,2)=50*RT
PEND
I=ROUT
E=21,22
END

```

図8 図1のECSDRDルーチン用データ

ル、接地のときはLAMPが1になる。トランジスタのときはLAMPが3になり、その他の素子のときは2になる。LAMPの値は指定すべき格子点の数となる。

(2) (1)で指定した素子がつながるべき格子点を指定する。入力すべき格子点の数は、LAMPで示され一点入力するごとにLAMPは1ずつ引かれる。与えられた素子に対して必要なだけの格子点を入力すると、その格子点間

に素子のシンボルを描きだす。描かれたシンボルの脇にその素子を指定するためのスイッチ点と素子番号が表示される。そしてLAMPが15になる。なお素子がトランジスタのときは、格子点の指定は、ベース、コレクタ、エミッタの順に行なり。

(3) (2)で入力された素子の値をテンキーから入力する。値が定義されると素子番号とその値が画面の右側に表示される。素子がトランジスタのときは、トランジスタの登録番号を入力する。トランジスタはあらかじめその等価回路を登録しておく。

(4) (2)の動作が終了しない時点で格子点の入力に誤りを生じたときは(1)からやり直す。

(5) (2)または(3)を終了した後(1)を省略し(2)へ進んでもよい。このとき素子は、前に定義してあるものと同じものとして処理する。

(6) 相互インダクタンスの指定では、LAMPは12ととり、相互インダクタンスをもつ2つのコイルを指定する。ここでの相互インダクタンスはM型式である。

(7) パラメータ可変を指定(シンボル矢印)するとLAMPは4となる。値を可変にする素子を指定する。相互インダクタンス、トランジスタは、このとき指定できない。この指定は全回路でただ一つの素子にしか有効でない。2つ以上指定したときは、最後に入力されたものが有効となる。パラメータ可変が指定された素子の値は、素子指定のときその素子の下限値を入力し、パラメータ可変指定時にその上限を入力する。

(8) 消去指定(シンボル×)はLAMPが4になる。消去すべき素子を指定すると、その素子の上に×が書かれ、その素子に関する情報が消される。

(9) LAMPが15でないときテンキーから入力すると、次のようになる。

0 キー入力 メインプログラムに戻る。

1~9 キー入力 (1)の素子指定と同じ効果

11 キー(記号000) 数値入力要求。すなわちCRT上にすでに書かれている素子を指定すると、その素子の値をテンキーから入力することができる。

12 キー(記号CLE) 今迄入力したデータを全て消去し、初めからやり直す。

INPUTGで出力として求められるものは、任意の二節点間の電位、インピーダンスまたは、任意の素子に流れる電流あるいは消費電力のうちの一つである。どれを選択するかは、CRTの上側に示された出力指定点によって行なり。電圧、インピーダンスを指定するとLAMPは2になり、求めようとする電位のあらわれる節点を指定する。電流、消費電力を指定するとLAMPは4になり、

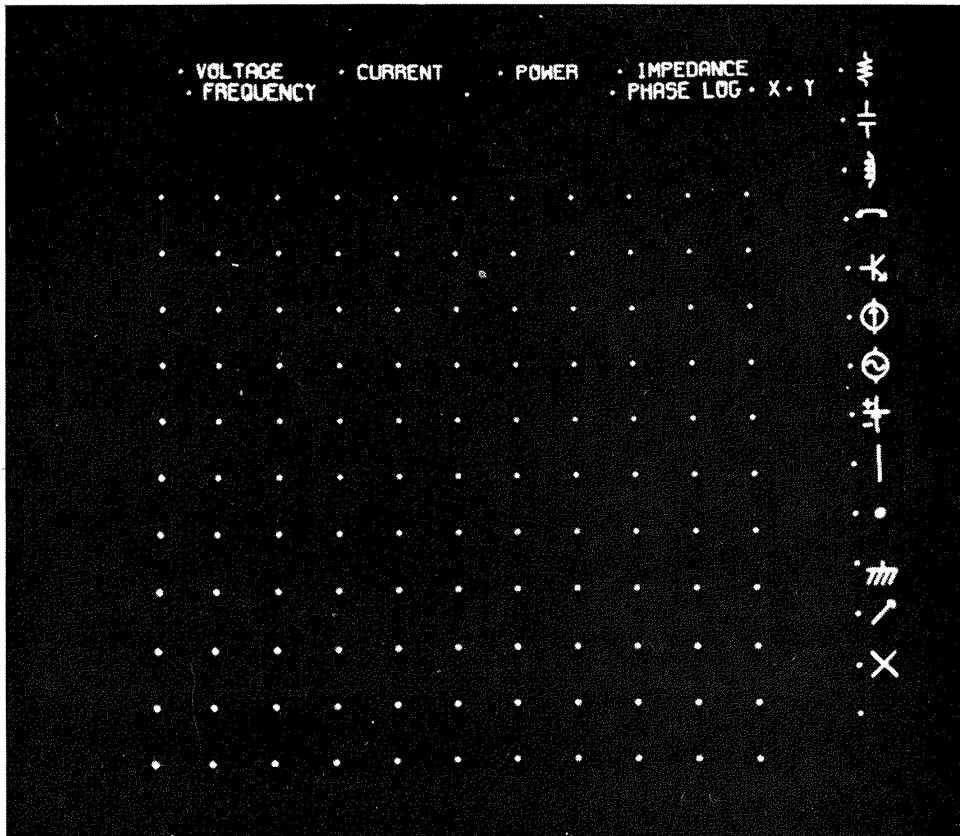


図9 初期パターン

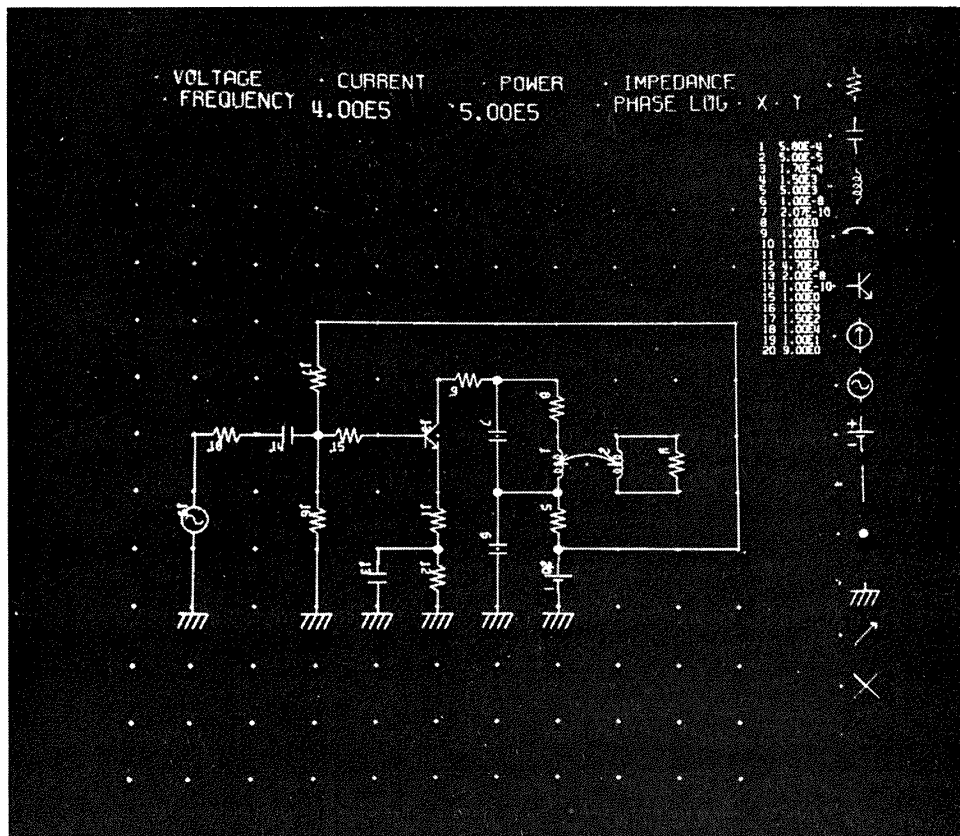


図10 データ入力の一例

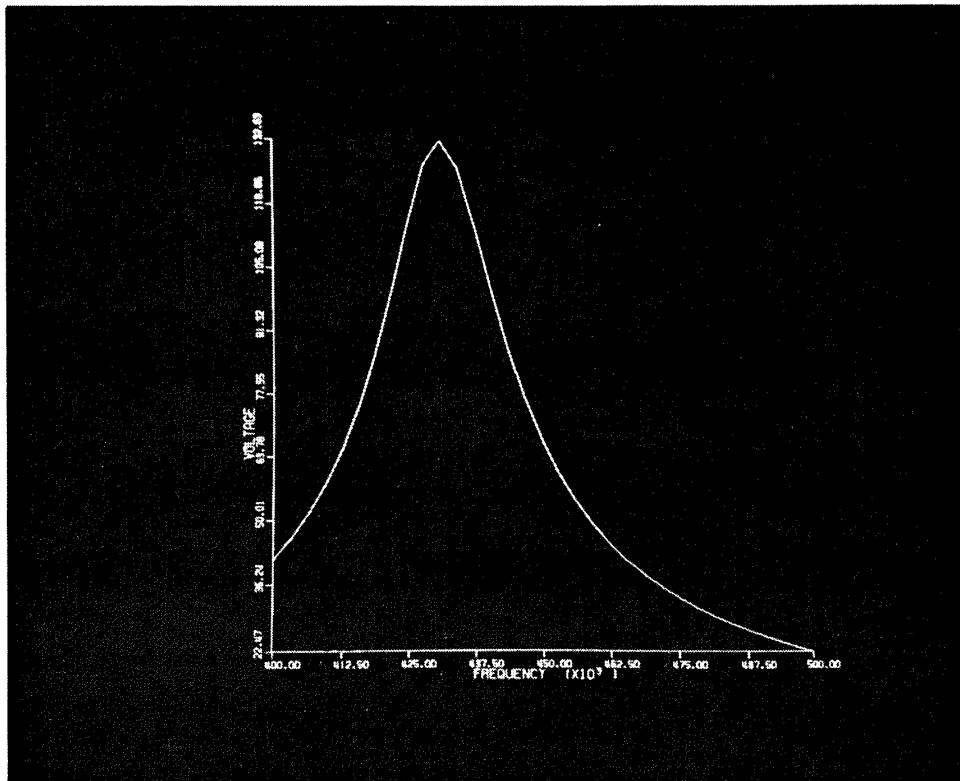


図 11 計算結果出力例

求めようとする電流の流れている素子を指定する。周波数指定点を指示すると LAMP は 15 になり、交流電源の周波数をテンキーより入力する。周波数を変化させたいときは、周波数指定点の右側にある点を指示すると周波数の上限値を入力できる。位相指定点を指示すると、解における位相が出力される。計算結果は CRT 上に表示されるが、周波数あるいは素子の値が変動するときはグラフで示される。このとき LOG 指定点の X を指定すると X 軸は対数軸となり、Y を指定すると Y 軸が対数軸となる。X, Y 両方指定してもよい。

計算開始指令点の指示で計算され、結果は CRT に表示される。計算が終了すると LAMP は 7 になり、テンキー入力を要求する。テンキー入力は次の意味をもつ、

1 キー入力 回路情報はそのまま保存され、出力指定のみが無効になる。

2 キー入力 回路情報、出力指定ともに有効

3 キー入力 全部のデータが消去され新しくやり直す。

1, 2 入力の場合、前に入力した回路データが CRT に再び表示され、回路の追加、変更、パラメータの変更が行なえる。

図 10 はこのようにして入力された図 1 の回路データ

である。出力指定は図 10 で 4 と定義された抵抗の両端の電圧を周波数 400 kHz から 500 kHz までの範囲で計算するよう指示した。図 11 はこの結果である。

5. INPUTG でのデータ

INPUTG における図形出力装置の果たす役割は、人間側から見たとき

- 1) 計算機の状態を示す。
- 2) 計算機に情報を入力する過程でのモニタリング
- 3) 計算結果の表示

の 3 つである。これらは INPUTG に限らず、一般にオンライン、リアルタイムで端末入出力機器を使用して計算機を使用する場合の端末出力装置にも言えることである。1) と 3) は計算機から一方的にデータを出力するだけであるが、2) では入力されてきたデータを解析し、それに応じた処理を行ない、必要に応じて入力データをパターン化し表示する。INPUTG では、入力装置から入ってくるデータは、テンキー入力データとタブレット入力データの 2 つである。これらは

- 1) テンキー入力データ
 - (a) 13 種類の文字データ
- 2) タブレット入力データ

- (b) 素子定義指定データ
- (c) 出力定義指定データ
- (d) 格子点指定データ
- (e) 素子指定データ

の5つに分けてある。タブレット面上は、プログラムでタブレット入力データの4つの領域が定められている。この中で素子指定は、素子が定義されるごとにその素子を示す領域が定義される。もちろん既に定義されている領域と重なることはない。プログラムは、常に入力待の状態になっている。入力装置からデータが入力されると、まずどのような種類のデータであるかを判定する。(a)~(e)までの分類に入らないデータは、意味のないデータであり、このときは直に入力装置に読み込みの命令が送り帰される。意味のあるデータのときは、その処理を行い、次に入力してほしいデータの種類の相当するパターンをLAMPに送り、読み込み命令を入力装置に出す。各入力データの処理は次の通りである。

素子定義指定（出力定義指定）データ

素子の種類を決定する。次にその素子が必要としているパラメータが格子点であるか、素子指定であるかの情

報をLAMPに送る。

格子点データ

節点番号を決定し、その節点のCRT上の位置を記憶する。LAMPキ1のときは、 $LAMP = LAMP - 1$ とし再び格子点データ入力を要求する。LAMP=1のときは、素子が必要としている格子点のデータ全てが入力されたのでデータをデータ・テーブルに書き込む。CRT上に素子のパターンを描き、タブレット上に素子指定のための領域を定義し、CRT上にそのスイッチ点を表示する。その素子が、素子の値を要求するものであれば、値をテンキーより入れるように要求する。

素子指定データ

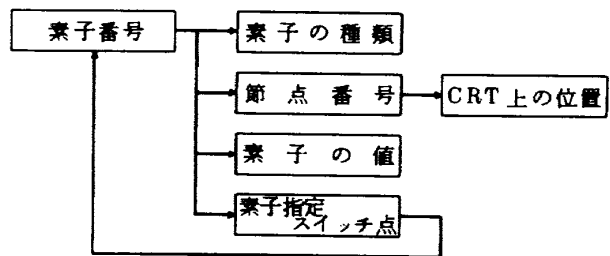


図12 INPUTGでのデータ構造

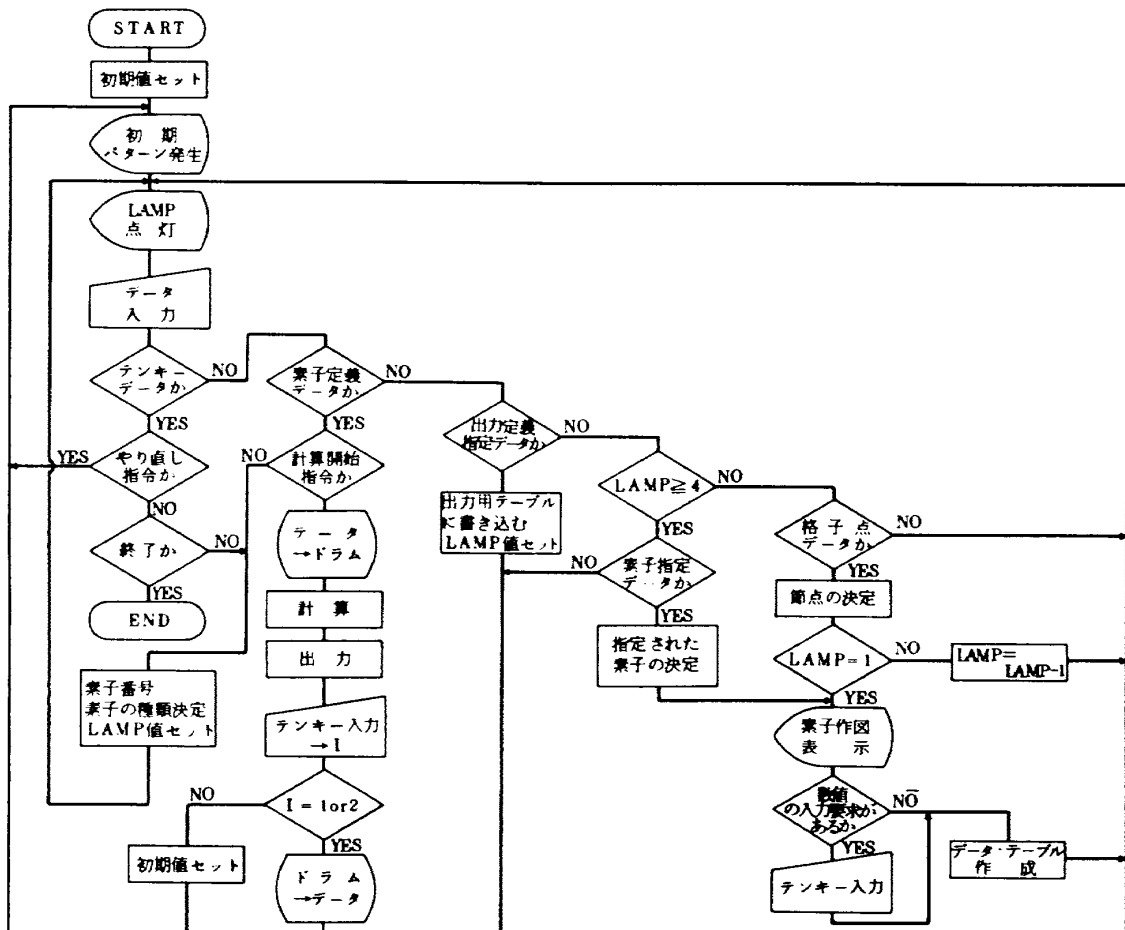


図13 INPUTGのフロー・チャート

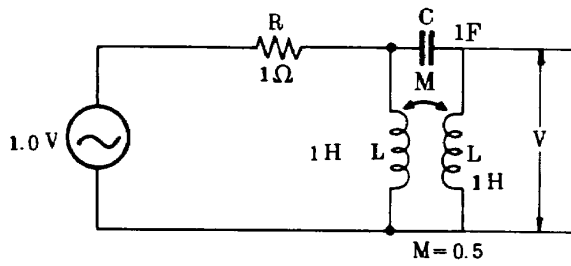


図 14 例 1 の回路

```

A(1,0)=1.0
R(1,2)=1.0
L1(2,0)=1
C(2,3)=1
L2(3,0)=1
M(L1,L2)=0.5
E=3,0
END
    
```

図 15 例 1 の回路データ記述

指定された素子の素子番号を決定する。

テンキー入力データ

数値入力要求が出されているときは、入力されたデータから 2 進フローティングのデータに変換し、データ・テーブルに書き込む。そして CRT の右側にその値を書く。数値入力要求が出されていないときは、ファンクション・キーの役目をする。

図 12 に INPUTG で作られるデータの構造を示す。計算開始指令データが入力されると、データの写しとしてデータがドラムに保存され、また ECNAP 用入力データに変換され、ECNAP に送られる。

ECNAP からの解は CRT に表示される。INPUTG のフロー・チャートを図 13 に示す。

6. ECNAP による計算例

例 1 相互インダクタンスを含む回路例

図 14 の回路の出力電圧 V を求める。図 15 は回路データを記述したものである。実際の V の値は

表 13 例 1 の計算結果

角周波数	数値計算による解		ECNAP による解	
	(実数部)	(虚数部)	(実数部)	(虚数部)
10^{-4}	0.5000000E-08	0.5000000E-04	0.5000001E-08	0.5000000E-04
10^{-3}	0.4999993E-06	0.4999992E-03	0.4999995E-06	0.4999993E-03
10^{-2}	0.4999375E-04	0.4999250E-02	0.4999377E-04	0.4999251E-02
10^{-1}	0.4937682E-02	0.4925246E-01	0.4937686E-02	0.4925247E-01
10	-0.1000000E+01	0.0000000E-40	-0.1000003E+01	0.1907357E-05
10	0.9890546E+00	0.1323195E+00	0.9890546E+00	0.1323194E+00
10^2	0.9998889E+00	0.1333230E-01	0.9998889E+00	0.1333229E-01
10^3	0.9999989E+00	0.1333332E-02	0.9999989E+00	0.1333332E-01

$$V = \frac{j\omega\{M - \omega^2 C(L^2 - M^2)\}}{R\{1 - 2\omega^2 C(L - M)\} + j\omega\{L - \omega^2 C(L^2 - M^2)\}}$$

になる。 $R=1$, $L=1$, $C=1$, $M=0.5$ のときの $\omega=0.0001$ から 1000 までの計算値を表 13 に示す。

例 2 多区間縦続回路例

図 16 に示す素回路網の n 区間縦続接続した回路の電

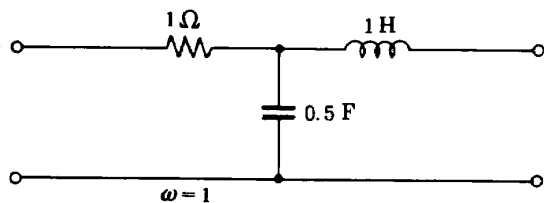


図 16 例 2 の素回路

表 14 例 2 の計算結果

段数	電圧利得	計算時間(秒)
10	4.421142×10^{-2}	4
20	1.381066×10^{-3}	7
30	4.315833×10^{-5}	10
40	1.348698×10^{-6}	13
50	4.214681×10^{-8}	17
60	1.317088×10^{-9}	21
70	4.115899×10^{-11}	26
100	1.256073×10^{-15}	40

圧利得を求める。図 16 の回路の F マトリックスは

$$(F) = \begin{pmatrix} 1+0.5j & 0.5+j \\ 0.5+0.5j & 0.5 \end{pmatrix}$$

であり、この多区間回路の全体の F マトリックスは

$$(F_n) = (F)^n = \begin{pmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{pmatrix}$$

となり、電圧利得は $1/a_n$ で与えられる。表 14 に計算結果と HITAC 5020 での計算時間を示す。この結果は、四倍精度による行列の計算から得た結果と一致した。なお二倍精度による行列の計算では $n = 54$ までの解しか得ることができなかった。図 17 に $n = 50$ のときの回路データ記述の例を示す。

例 3 非正弦周期波の例

方形波と三角波をそれぞれ図 18 の回路に入力したときの出力波形を XY プロッターにより描かせる。方形波

```

A(1,0)=1,0
PORT(1,2,0,0)=F
PORT(2,3,0,0)=F
PORT(3,4,0,0)=F
PORT(4,5,0,0)=F
PORT(5,6,0,0)=F
PORT(6,7,0,0)=F
PORT(7,8,0,0)=F
PORT(8,9,0,0)=F
PORT(9,10,0,0)=F
PORT(10,11,0,0)=F
F=1,12,4,0
R(1,3)=1
C(3,4)=0.5
L(3,2)=1
R(2,5)=1
C(5,4)=0.5
L(5,6)=1
R(6,7)=1
C(7,4)=0.5
L(7,8)=1
R(8,9)=1
C(9,4)=0.5
L(9,10)=1
R(10,11)=1
C(11,4)=0.5
L(11,12)=1
PEND
E=11,0
END
    
```

図 17 例 2 の回路記述例 ($n = 50$)

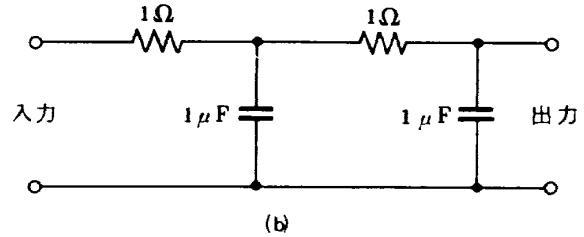
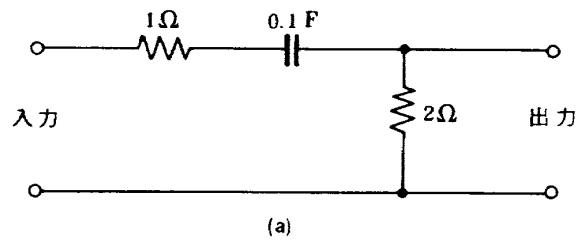


図 18 例 3 の回路

三角波をフーリエ変換により、基本波の振幅の 0.005 以上の振幅を持つ正弦波に分解し計算した。図 19 は方形波入力時の出力波形、図 20 は三角波入力時の出力波形である。

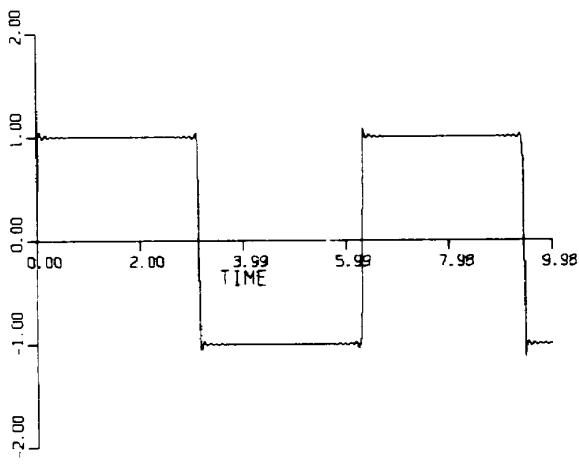
7. むすび

定常状態での電気回路解析プログラムを作成し、CAD の基本的な実験を行なった。ここでは、電子計算機と人間のソフト・ウェアにおけるインターフェースという点に重点を置いた。本報告で述べたプログラムでは、ストレージ型 CRT とランド・タブレットを用いた図形入出力端末装置を使い、オンライン、リアルタイムで人間と計算機との情報交換が行なえる。人間が CRT 上に解析したい電気回路をそのままの形で描くことにより、計算機に回路データが入力され、直ちに回路解析が行なわれ、その結果が CRT 上に再び表示されるというシステムは、非常に有効であることを確かめた。また回路解析において節点消去法を取り入れ、短絡素子を導入した。得られた結果をまとめると

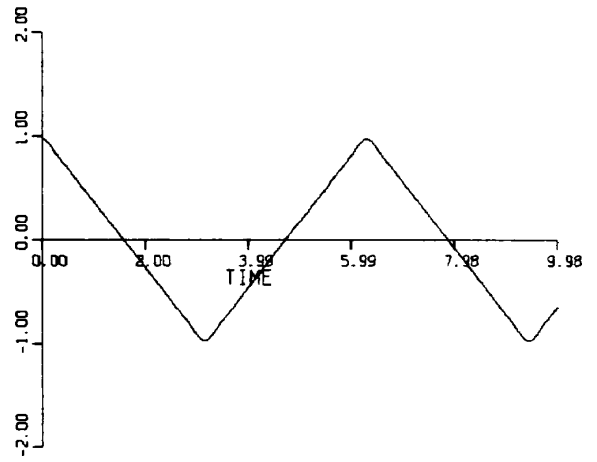
(1) ストレージ型 CRT とランド・タブレットを用いた簡易型図形入出力装置は、動的な図形の表示ができないという不便な点もあるが、使用目的によっては本格的な図形入出力装置とほぼ等しい仕事をさせることができる。

(2) 回路行列を作る前に不要な節点を消去し、回路行列を小さくする方法を提案した。この結果従来のこの種のプログラムで扱えないような大きな問題も扱えるようになった。

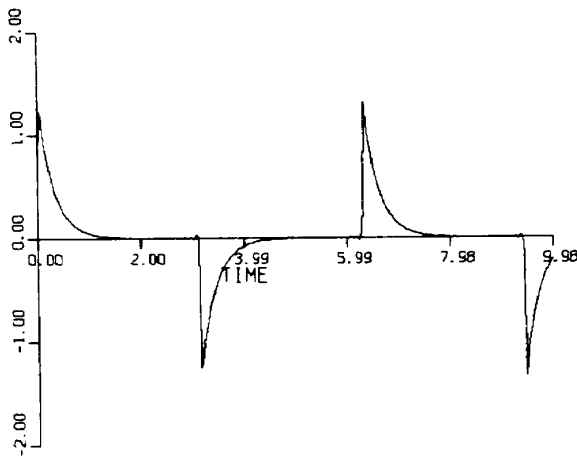
(3) 短絡を一つの独立した素子として扱った。この結果回路記述および処理過程での融通性が増した。



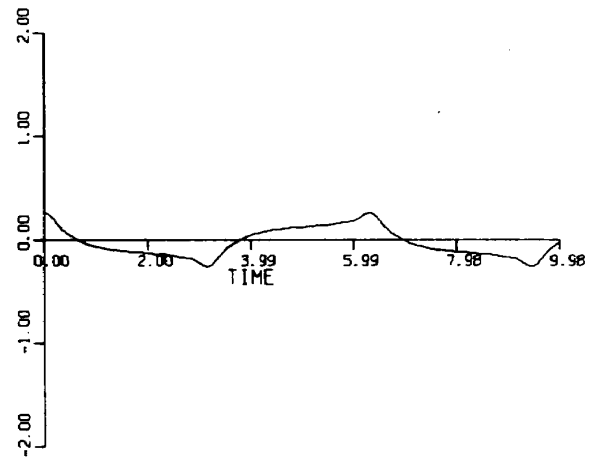
(a) 入力波形



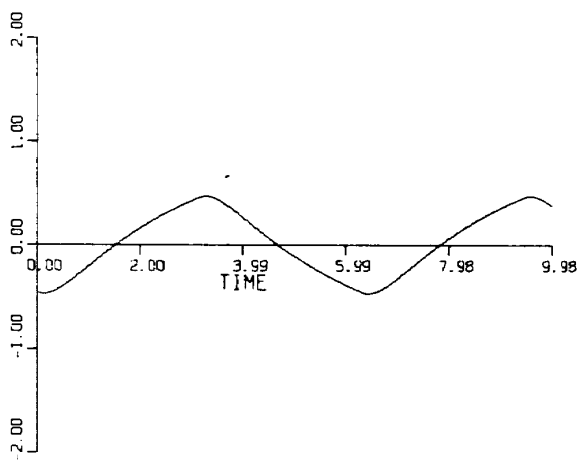
(a) 入力波形



(b) 図 18 (a) の出力波形

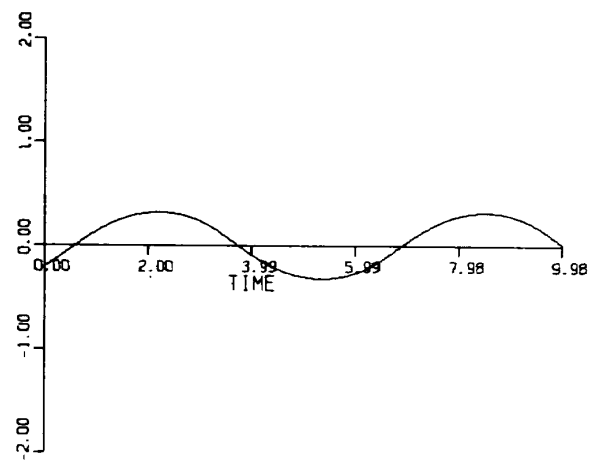


(b) 図 18 (a) の出力波形



(c) 図 18 (b) の出力波形

図 19



(c) 図 18 (b) の出力波形

図 20

付録 1. 線型電気回路

線型電気回路⁷⁾であつた基本素子は抵抗 R , 容量 C , インダクタンス L の 3 種類である。電気回路解析とは RCL の組合せで構成された回路に電源を接続したときの各素子に加わる電圧 e および各素子に流れる電流 i を調べることである。素子と e , i の間には次の関係が成り立つ。

抵抗 $e = Ri$ (1)

容量 $e = \frac{1}{C} \int i dt$ (2)

インダクタンス $e = L \frac{d}{dt} i$ (3)

(1), (2), (3)式は Z なるオペレータを導入して

$e = Zi$ (4)

と書く。また $Y = Z^{-1}$ なるオペレータを考えると

$i = Ye$ (5)

と書ける。 Z をインピーダンス, Y をアドミタンスと呼ぶ。

回路に接続される電源の波形が正弦波のときは

$e(t) = E_e \sin(\omega t + \theta_e) = \text{Imag.}(E_e e^{j(\omega t + \theta_e)})$ (6)

$i(t) = I_e \sin(\omega t + \theta_i) = \text{Imag.}(I_e e^{j(\omega t + \theta_i)})$ (7)

であらわされる。そこで電圧・電流を次のような形式で表現する。

$E = |E| e^{j(\omega t + \theta_e)}$ (8)

$I = |I| e^{j(\omega t + \theta_i)}$ (9)

このような E , I を複素電圧, 複素電流といい, E と I の間にも(4), (5)式が成り立つ。また

$\frac{d}{dt} E = j\omega E$ (10)

$\frac{d}{dt} I = j\omega I$ (11)

であるから(1), (2), (3)式は

$E = RI$ (12)

$E = I/j\omega C = Z_C I$ (13)

$E = j\omega LI = Z_L I$ (14)

式 1.

$$\begin{matrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,n-1} & 0 & a_{1,n+1} & \dots & a_{1,l} & ; & I_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n-1,1} & \dots & a_{n-1,n-1} & 0 & a_{n-1,n+1} & \dots & a_{n-1,l} & ; & I_{n-1} \\ 0 & \dots & 0 & a_{n,n} & a_{n,n+1} & \dots & a_{n,n+m} & \dots & 0 & \dots & 0 & ; & 0 \\ a_{n+1,1} & \dots & a_{n+1,n} & \dots & \dots & \dots & a_{n+1,l} & ; & I_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n+m,1} & \dots & a_{n+m,n} & \dots & \dots & \dots & a_{n+m,l} & ; & I_{n+m} \\ a_{n+m+1,1} & \dots & a_{n+m+1,n-1} & 0 & a_{n+m+1,n+1} & \dots & a_{n+m+1,l} & ; & I_{n+m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix}$$

と書ける。

電気回路においてはキルヒホッフの法則が成り立っている。すなわち

第一則；任意の節点に入出する電流の総和は零である。

$\Sigma I = 0$ (15)

第二則；任意の閉路で同一方向にすべての起電力および逆起電力を加えたものは零になる。

$\Sigma E - \Sigma I Z = 0$ (16)

以上(14), (15), (16) の関係式で線形電気回路は完全に記述できる。

いま回路の全節点のうちの一つの節点 N_0 の電位を零とし, 他の節点 N_k の電位を $N_k - N_0$ 間の電圧とする。全節点についてキルヒホッフの第一則を適用すると次のような式が得られる。

$$\left. \begin{matrix} Y_{11} E_1 - Y_{12} E_2 & \dots & -Y_{1n} E_n = I_1 \\ -Y_{21} E_1 + Y_{22} E_2 & \dots & -Y_{2n} E_n = I_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ -Y_{n1} E_1 - Y_{n2} E_2 & \dots & +Y_{nn} E_n = I_n \end{matrix} \right\} (17)$$

回路の全節点は $n+1$ である。対角項 $Y_{11}, Y_{22}, \dots, Y_{nn}$ は各節点の自己アドミタンスといわれるものでその節点以外の節点を接地したときのアドミタンス, 非対角項 $Y_{kl} (k \neq l)$ は節点 k と節点 l との間のアドミタンスである。(17) をマトリックス形式で書くと

$(I) = (Y)(E)$ (18)

これから

$(E) = (Y)^{-1}(I)$ (19)

このような解析法を節点解析 (nodal analysis) という。

付録 2. 一般化した Y-Δ 変換の証明

節点 N に素子が M 個接続されていて, かつ節点 N には電流源が接続されていないとする。このときの回路マトリックスは式 1 のようになる。ただし, M 個の素子が接続されている節点のうち節点 N 以外の節点をそれぞれ $N+1, N+2, \dots, N+M$ とする。

- 5) J. Katzenelson; AEDNET: A simulator for non-linear networks, Proc. IEEE, Vol. 54, No. 11 (Nov. 1966) pp 1536-1552
- 6) M.L. Dertouzos; CIRCAL: On-line circuit design, Proc. IEEE, Vol. 55, No. 5 (May 1967) pp 637-654
- 7) 川上正光; 基礎電気回路, (昭和37年), コロナ社

航空宇宙技術研究所報告 365号

昭和49年5月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)千182

印刷所 有限会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
