

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-428

オンライン騒音解析システム

武田克己

1980年12月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. まえがき	1
2. システムを構成するハードウェア	2
2-1 各要素の性能	2
3. システムに関するハードウェア	4
3-1 実行手順	4
3-2 解析方法	5
4. デジタル方式におけるスペクトル推定の問題点及び誤差	7
4-1 離散化およびダイナミックレンジ	7
4-2 スペクトルの推定誤差	8
5. システム応用例	9
5-1 パワースペクトル	9
5-2 音源の推定	11
5-3 時間領域分析	13
6. 結 論	13
付録1 時系列言語 TSL	14
付録2 分析処理モジュール(NAL2)及び表示モジュール(NAL3)のフローチャート	15

オンライン騒音解析システム*

武 田 克 己**

1. まえがき

航空機公害グループにおいては、ジェットエンジンの騒音に関する研究をすすめているがこれに伴う騒音測定等において時間的に変動する大量のデータを分析処理する必要が常に生じる。この場合騒音データを多チャンネルデータレコーダに記録し、その後再生分析を行うという方式では、実験結果を得るまでに多くの時間を必要とし研究を効率的にすすめていく上で不都合である。そこで時間的に変動する大量の信号を高速処理し、実験中あるいは実験終了後速かに所要の実験結果を指定したフォーマットで表示できるオンライン解析システムを設計、製作した。本システムの外観を図1に示す。一般に騒音や振動の分析においては、周波数領域及び時間領域での結果が必要である。また、分析方法にはアナログとデジタル方式とがある。各方式はそれぞれの特徴を持っているが、特にデジタル方式は記憶の確実性、演算精度の高さ、雑音混入が少ないこと、あるいは他の量への変換が簡単などの利点を持っているが反面高価でもある。本システムは、これらの利点を取入れたデジタル方式とし、かつミニコンと連動させ実験条件によってプログ

ラムや分析条件などをテレタイプから任意に設定、修正を行なうことができる対話方式とした。これらのプログラムは、すべて時系列言語 (TSL)⁽¹⁾ に依っている。ここではスペクトルの得られた結果の誤差推定および応用例などについても言及する。

記 号

B	；周波数分解能 (基本周期の逆数)
B_e	；時間領域平滑化の有効分析バンド幅
B_1	；周波数領域平滑化の有効分析バンド幅
B_2	；時間、周波数領域平滑化の有効分析バンド幅
E	；期待値
f_{max}	；最高分析周波数 (Hz)
f_s	；サンプリング周波数 (Hz)
f_c	；エイリアシング・フィルタカットオフ周波数 (Hz)
f_L	；バンド幅の下限周波数 (Hz)
f_H	；バンド幅の上限周波数 (Hz)
FFT	；高速フーリエ変換
$G_0(f)$	；パワースペクトル関数
$G_A(f)$	；片側パワースペクトル関数 (1チャンネル)

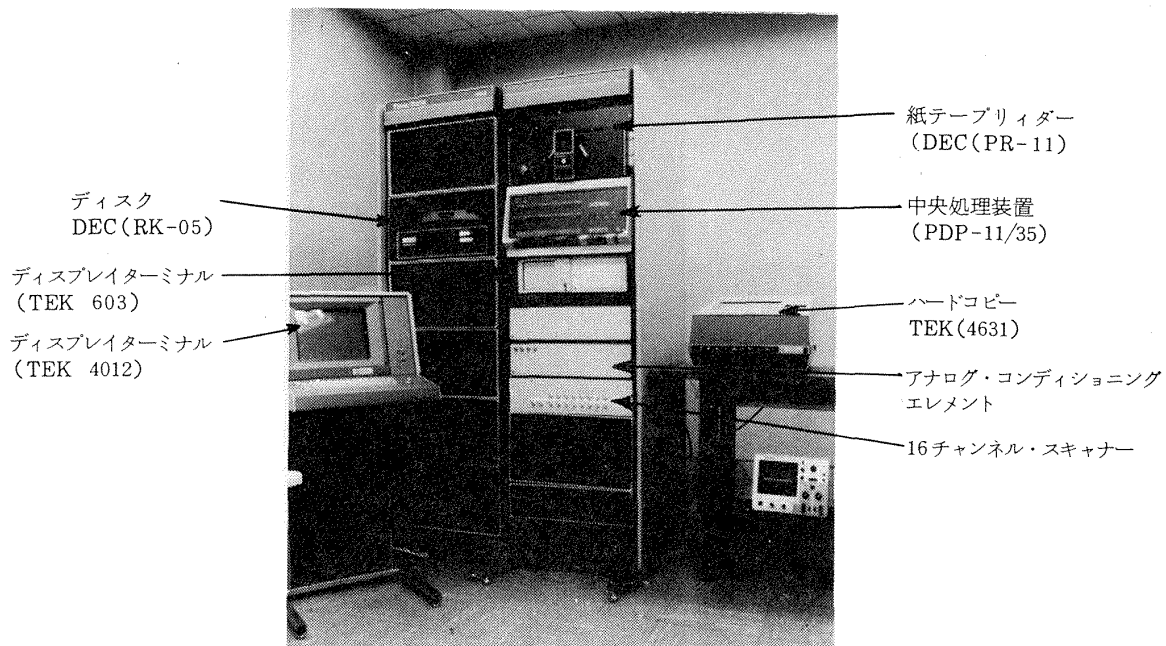


図1 オンライン騒音解析システム

* 昭和55年12月6日受付

** 航空機公害研究グループ

$G_B(f)$; 片側パワースペクトル関数 (2チャンネル)

$G_{AB}(f)$; 片側クロスパワースペクトル関数

$H(f)$; 周波数応答関数

h ; サンプル間隔

IFT ; 高速逆フーリエ変換

j ; $\sqrt{-1}$

l ; 周波数領域平滑化における周波数成分の和

N ; フレームサイズ

n ; 自由度

$R_x(\tau)$; 自己相関関数

$R_{xy}(\tau)$; 相互相関関数

S/N ; 信号対雑音比

s ; 標本標準偏差

s^2 ; 標本分散

T ; 観測時間

T_s ; 観測時間を分割した1回の観測時間

t ; 時間変数

$\{x(t)\}$; 短時間時系列標本信号

$X(f)$; $\{x(t)\}$ のフーリエ変換スペクトル

$V_{ar}(\cdot)$; 分散

$\langle \cdot \rangle$; 推定値

ϵ_r ; 標準誤差

χ^2 ; カイ2乗変数

$r^2(f)$; コヒーレンス関数

σ^2 ; 分散

2. システムを構成するハードウェア

本システムのブロックダイアグラムを図2に示したが、騒音、振動などの時系列信号をスキャナ (16チャンネル) に導き、スキャナコントローラ (DEC社 DR11-C) の制御信号によって、同時刻に2チャンネルの信号をアナログコンディショニングエレメントで設定されたデータ取込条件のもとでディジタル信号に変換する。この取込スタートは、現場に置かれた外部トリガー信号発生器のスナップスイッチによって行う。ディジタル信号に変換された数値は、ミニコン (DEC社製 PDP-11/35) に転送され、時間領域および周波数領域への後処理を行ないリアルタイムで表示し、またはディスク (DEC社製 RK 05) に記憶する。この後ディスプレイ (TEK社製 4012) 上に、あらかじめ指示したフォーマットでパワースペクトル、1/3 または 1/12 オクターブバンド、伝達関数、コヒーレンス、PNL⁽²⁾ (Perceived Noise Level)、時間関数などを表示し、必要なデータをハードコピーに記録できる。またオフライン処理は、8チャンネルスキャナを通さないで直接アナログコンディショニングエ

レメントから2チャンネル同時処理可能である。

2-1 各要素の性能

a 主演算処理装置 (PDP-11/35)

記憶容量 ; 28k 語 16ビット/語

アドレス方式 ; 直接, 間接およびインデックス相対 (全て16ビット表示)

サイクルタイム ; 900ns

処理モード ; 2モード (カーネル, ユーザモード)

汎用レジスタ ; 各モード毎に8個

ハードウェア拡張演算機能 ; ダイレクトメモリアクセス, スタック処理機能を装備

動作温度 ; 10℃ ~ 40℃

動作湿度 ; 95% (相対) 以下

b アナログコンディショニングエレメント (AEC)

入力チャンネル ; 2チャンネル

入力アッテネータ ; プログラム制御方式

(± 0.125 , ± 0.25 , ± 0.5 , ± 1.0 , ± 2.0 , ± 4.0 , ± 8.0 , ± 10.0 V)

サンプリング周波数 ; 表1に示す周波数コードとレンジコードを任意に選びプログラムで設定することができる。このサンプリング周波数は、周波数コードによって指定される周波数 f_{so} にレンジコードで指定される f_u を掛けたものとなる。

$f_s = f_{so} \times f_u$ (Hz)

オーバフロー検出機能付

エイリアシングフィルター ; 0 ~ 50 KHz (12 ステップ制御可能), 48 dB/Oct.

表1 サンプリング周波数コード表

周波数コード対 f_{so}		レンジコード対 f_u	
コード	f_{so} (Hz)	コード	f_u
0	16.0	0	1000
1	16.384	1	100
2	20.48	2	10
3	25.6	3	1
4	32.0	4	0.1
5	32.768	5	0.01
6	40.96	6	0.001
7	51.2		
8	64.0		
9	81.92		
10	102.4		

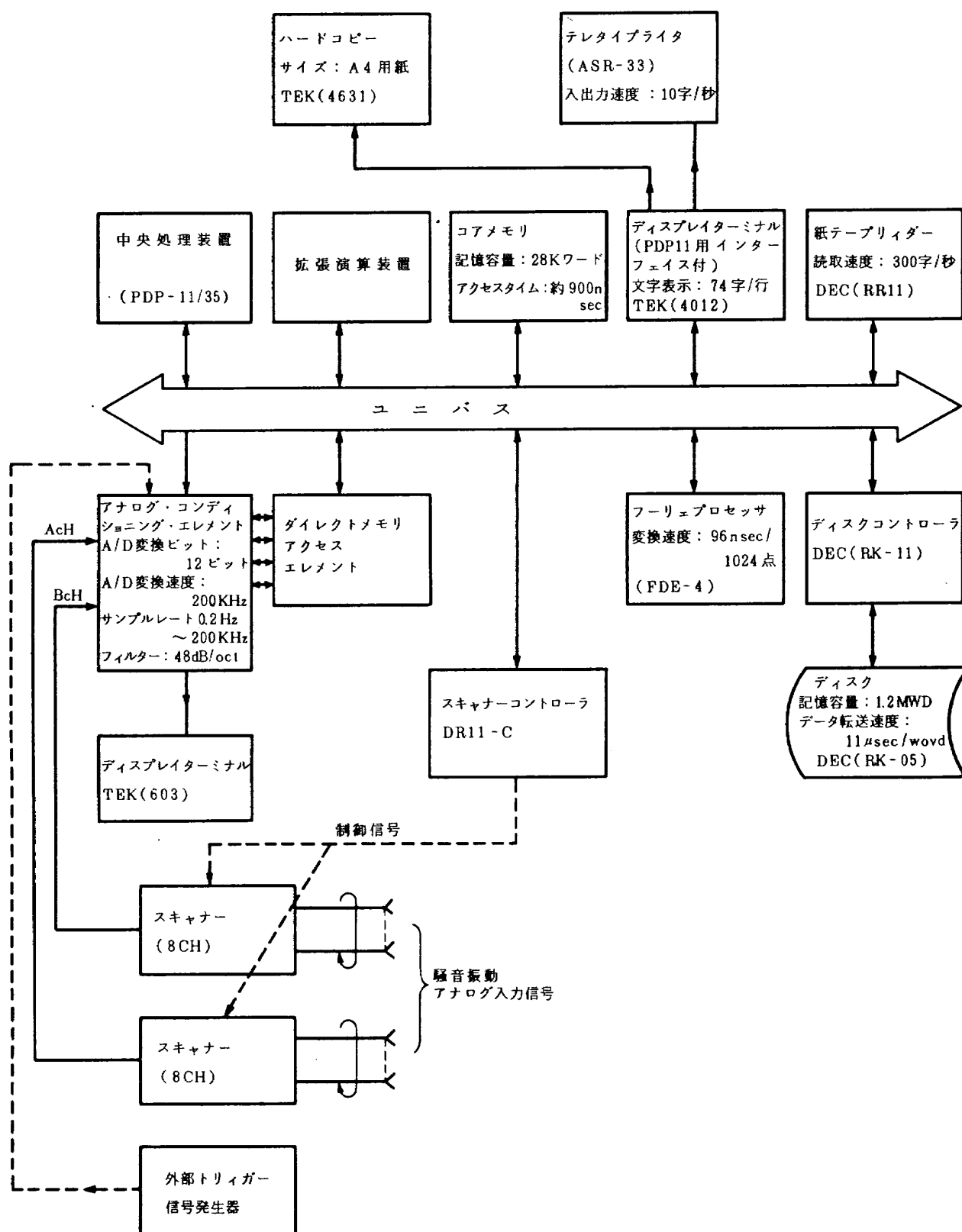


図2 オンライン騒音解析システムブロックダイアグラム

c デジタルソースインターフェイス (DSI)

A/D変換された多チャンネル (最大 64 チャンネル増設可能) データを DMA (Direct Memory Access) 送するハードウェアプロセッサである。

d フーリエプロセッサ (Time Data 社製, FPE-4)

高速で周波数領域に変換するフーリエプロセッサである。

データフレームサイズ; 実数タイプ 8 ~ 8192 ポイント

データフレームサイズ; 複素数タイプ, 4 ~ 4096 ポイント

分析処理時間; それぞれ一例を表 2 に示す。

表 2 分析処理時間

条 件	入力フレーム数	処理時間 (ms)
フーリエ変換	128	9.0
	1024	96.0
	128	11.4
	1024	113.0
パワー スペクトル	128	13.2
	1024	122.1
クロスパワー スペクトル	128	31.9
	1024	296.0

e スキャナー

8チャンネルの入力信号を 1.5msec の切替速度でスキャナーコントローラの制御信号により作動する。

f 表示装置

ディスプレイ・ターミナル (TEK 社製 4012), ハードコピー (TEK 社製 4031) より構成され, 以下の特性をもっている。

文字表示; 74 文字 / 行, 35 行 (2590 文字 / 画面)

表示面積; 8 インチ (幅) × 6 インチ (高)

グラフィックス・マトリックス; 1024 (X 軸) × 780 (Y 軸)

複写サイズ; A 4 サイズ

図面表示速度; 2.6msec / ベクトル

g データ記憶装置 (DEC 社製 RK-11, RK-05 カートリッジディスク)

記憶容量; 1.2 Mwords

データ転送速度; 約 11 μ sec / word

3. システムに関するハードウェア

分析ソフトウェアは, 付録 1 の表 A-1 に示すような Time Data 社製の時系列言語 (TSL) より作られたソースプログラム (TSLR51)⁽¹⁾, アナログ処理を行なうプログラム (AEC2CH)⁽³⁾ および画像処理用プログラム (DISPLY)⁽⁴⁾ より成る。オンラインソフトは, 表 3 に示すようなモジュールに分かれ必要なモジュールを呼び出すことによって所定の分析処理を行なうことができる。

表 3 使用モジュール一覧表

モジュール名	機 能
PAL	パラメータファイルのアロケーション
CAL	測定キャリブレーション値計算
ATS	入力電圧レベル設定
FCT	表示キャリブレーション値設定
PNL	PN 表示チャンネル順の指定
NAL1	分析チャンネルの指定
NAL2	A/D 入力, データ分析処理
NAL3	解析処理結果表示

3-1 実行手順

それぞれの分析を行なう場合は, 表 4 の実行順序に従いモジュールを呼び出すことにより分析処理する。例として分析処理モジュール (NAL2), 表示モジュール (NAL3) のフローチャートを付録 2 に, またパワースペクトルデータ取込プログラム (NAL21) を図 3 に示すにとどめる。

表 4 分析実行順序

手順番号	パワー スペクトル	1/3, 1/12 オクターブ スペクトル	伝達関数
1	PNL	PAL	PAL
2	ATS	ATS	ATS
3	CAL	CAL	CAL
4	NAL1	PNL	NAL1
5	NAL2	NAL1	NAL2
6	FCT	NAL2	FCT
7	NAL3	FCT	NAL3
8		NAL3	

```

LIST NAL21
CREATE NAL21
10 REMARK *** AUTO SPECTRUM ANALYSIS ***
20 REMARK * CALIB.DAT
30 REMARK *
40 BLKCLR
50 BLKDEF B0,128
52 OPEN 2,'NALWFK'
54 READB 2,B0
55 DIF I9,I9,1
56 CLOSE 2
70 BLKDEF B1,40
80 BLKDEF B3,2048,1
90 BLKDEF B4,2048,1
100 BLKDEF B5,512
110 BLKDEF B6,512
130 OPEN 1,'CALIBF.DAT'
132 READB 1,B1,'R',1
134 WRITEB 0,B1
140 READB 1,B1,'R',0
150 CLOSE 1
460 REMARK *
470 FOR I2,1,10
480 BLKDEF B2,10,1,B3,0
490 ANINIT B2,10,1,9,0,88,0,-5,0,0
500 ERASE
501 PRINT 'READY FOR INPUT RECORD:',I2
510 ANINP
520 REMARK **
530 FOR I3,13,92,10
540 LET I5,B0,I3
550 SUM I7,I3,5
560 LET I6,B0,I7
570 IF I5,0,580,860,580
580 SUM I8,I5,9
590 SUM I9,I6,9
600 PROD I7,B1,I8,10
610 SUM I7,I7,B1,I9
620 REMARK
630 REMARK CHANNEL SELECT (I5,I6=CH*)
640 CHNNL I5,I6
670 ANINIT B3,2048,3,9,0,I7,0,0,11,0
680 ZERO B5
690 ZERO B6
700 REMARK ***
710 FOR I4,1,11
720 ANINP
730 DFT B3,1
740 DFT B4,1
750 ASPEC B3,B5
760 ASPEC B4,B6
770 BLKDEF B3,2048,1,B3,0
780 BLKDEF B4,2048,1,B4,0
790 NEXT I4
800 REMARK ***
810 QUOT R0,1,I1
820 MLCONR R0,B5
830 MLCONR R0,B6
832 LET B5,511,0
834 LET B6,511,0
840 WRITEB 0,B5,I15
845 IF I15,0,1000,850,1000
850 WRITEB 0,B6,I15
855 IF I15,0,1000,860,1000
860 NEXT I3
870 REMARK **
880 NEXT I2
881 BIBSET B5,6,R10
882 LET B0,100,R10
883 BIBSET B5,8,I10
884 LET B0,101,I10
885 WRITEB 0,B0,'R',0
890 REMARK *
900 LOAD 'NAL24'
910 RETURN
1000 PRINT 'ERROR...DISK FULL'
1010 RETURN
END

```

図3 プログラムリスト NAL21

3-2 解析方法

a) パワースペクトル解析

騒音信号 $(x(t))$ を

$$X(f, T_s) = FFX(x(t)) \quad (1)$$

のようにフーリエ変換したのちパワースペクトル $G(f, T_s)$ を次式で求める。

$$\hat{G}(f, T_s) = X(f, T_s) \overline{X(f, T_s)} \quad (2)$$

ただし騒音がランダム信号の場合は、大きい推定誤差をもっており、これを小さくする為にK回で平均したパワースペクトル $G_0(f)$ を次のように求める。

$$G_0(f) = 1/k \sum \hat{G}(f, T_s) \quad (3)$$

b) 1/3 及び 1/12 オクターブバンド分析

1/3, 1/12 オクターブバンド分析は、(3)式より求めたパワースペクトルを次のように周波数範囲内で積分する。

$$G_{0 \text{ Oct.}(i)} = \int_{f_L}^{f_H} G_0(f) df \quad (4)$$

$$f_H = f_x(i) \times 2^{\frac{1}{2m}} \text{ バンド境界上限周波数}$$

$$f_L = f_x(i) \times 2^{\frac{-1}{2m}} \text{ バンド境界下限周波数}$$

$$m = 3 \quad (1/3 \text{ オクターブバンド})$$

$$m = 12 \quad (1/12 \text{ オクターブバンド})$$

$$i = 1, 2, 3, \dots \text{ (バンド数)}$$

$$f_x(i) = \text{バンド中心周波数}$$

このような分析による 1/3 又は 1/12 オクターブバンドへの変換は、対象となる周波数領域で誤差をなるべく一定にするためサンプリングフレーム(N)を一定としサンプリング周波数(f_s)を三種類設定し、(4)式の計算によって行なった。三種類の分析レンジとこれに対応する周波数範囲を表6に示す。

c) 伝達関数

ある線形系の入力信号を $(x_A(t))$ として、その系の出力信号を $(x_B(t))$ としたときの伝達関数は、次のように示される。

$$H(f) = \frac{G_{0AB}(f)}{G_{0A}(f)} = \frac{\frac{1}{k} \sum \hat{G}_{AB}(f, T_s)}{\frac{1}{k} \sum \hat{G}_A(f, T_s)} \quad (5)$$

ここで $G_{AB}(f, T_s)$ はクロススペクトルで

$$\hat{G}_{AB}(f, T_s) = X_A(f, T_s) \overline{X_B(f, T_s)} \quad (6)$$

のように表わされる。

表5 1/3 及び 1/12 オクターブバンド中心周波数

1/3 オクターブバンド		1/12 オクターブバンド	
No.	中心周波数 Hz	No.	中心周波数 Hz
1	16	1	14.20
		2	15.04
		3	15.93
		4	16.87
2	20	5	17.87
		6	18.93
		7	20.05
		8	21.24
3	25	9	22.55
		10	23.89
		11	25.31
		12	26.81
4	31.5	13	28.40
		14	30.08
		15	31.86
		16	33.75
5	40	17	35.75
		18	37.86
		19	40.11
		20	42.49
6	50	21	45.11
		22	47.78
		23	50.62
		24	53.62
7	63	25	56.79
		26	60.16
		27	63.72
		28	67.50
8	80	29	71.50
		30	75.70
		31	80.22
		32	84.98
9	100	33	90.22
		34	95.56
		35	101.2
		36	107.2
10	125	37	113.6
		38	120.3
		39	127.4
		40	135.0
11	160	41	143.0
		42	151.5
		43	160.4
		44	170.0
12	200	45	180.4
		46	191.1
		47	202.5
		48	214.5
13	250	49	227.2
		50	240.6
		51	254.9
		52	270.0
14	315	53	286.0
		54	302.9
		55	320.9
		56	339.9
15	400	57	360.9
		58	382.3
		59	404.9
		60	428.9
16	500	61	454.3
		62	481.3
		63	509.8
		64	540.0

1/3 オクターブバンド		1/12 オクターブバンド	
No.	中心周波数 Hz	No.	中心周波数 Hz
17	630	65	572.0
		66	605.8
		67	641.8
		68	679.8
18	800	69	721.8
		70	764.5
		71	809.9
		72	857.9
19	1 k	73	908.7
		74	962.5
		75	1.019k
		76	1.079k
20	1.25 k	77	1.144k
		78	1.212k
		79	1.283k
		80	1.359k
21	1.6 k	81	1.443k
		82	1.529k
		83	1.619k
		84	1.715k
22	2 k	85	1.817k
		86	1.925k
		87	2.039k
		88	2.159k
23	2.5 k	89	2.288k
		90	2.423k
		91	2.567k
		92	2.719k
24	3.15 k	93	2.887k
		94	3.058k
		95	3.239k
		96	3.431k
25	4 k	97	3.634k
		98	3.850k
		99	4.078k
		100	4.319k
26	5 k	101	4.576k
		102	4.847k
		103	5.134k
		104	5.438k
27	6.3 k	105	5.774k
		106	6.116k
		107	6.479k
		108	6.863k
28	8 k	109	7.269k
		110	7.700k
		111	8.156k
		112	8.639k
29	10 k	113	9.152k
		114	9.694k
		115	10.27k
		116	10.88k
30	12.5 k	117	11.55k
		118	12.23k
		119	12.96k
		120	13.73k
31	16 k	121	14.54k
		122	15.40k
		123	16.31k
		124	17.28k

表6 1/3及び1/12オクターブバンド分析におけるレンジと
サンプリング周波数及び分解能

レンジ	1/3 オクターブバンド 中心周波数 (Hz)	1/12 オクターブバンド 中心周波数 (Hz)	サンプリング周波数 f_s (Hz)	分解能 B (Hz)
1	20 ~ 160	16.8 ~ 160	800	0.2
2	200 ~ 1600	168 ~ 1600	8000	2.0
3	2000 ~ 16000	1680 ~ 16000	80000	20.0

4. デジタル方式におけるスペクトル推定の問題点及び誤差

デジタル方式によるスペクトル解析においてはデータは離散的でかつデータ長が有限であるなどの制限をもち、いかにより良いスペクトルの推定量を得るかが問題である。他にも多くの問題点が指摘されているがここでは、離散化にともなう問題点とスペクトル推定について述べる。

4-1 離散化およびダイナミックレンジ

デジタル化とは、データの瞬時点での値を定める為のサンプリングと入力信号を数値に変換する量子化の2つの部に分けられる。まずサンプリングは、連続信号を等間隔 (Δt) で行うが、この Δt をあまり狭くすると計算時間が長くなり、逆に Δt を大きくした場合は低周波

と高周波の混合などが生じてくる。次に量子化については、データの無限個レベルを有限個のレベルで近似する為にかかる量子化誤差が問題となる。このような誤差は、A/D変換器のビット数に依存する量である。本システムは、A/D変換器12ビットでアンチエイリアシングフィルタ (48 dB/oct.) を採用し、ダイナミックレンジはほぼ72 dBである。サンプリング周波数 f_s は、サンプリング定理により分析最高周波数 (f_{max}) の2倍以上が必要であるが、ホワイトノイズのように周波数帯域が広いノイズの分析においては、エイリアシングによって $f_s/2$ で折り返しが生じる為にシステムのダイナミックレンジのレベルまで使用出来ない。これらをさける為に本システムは、 f_{max} の4倍でサンプリングを行ない、アンチエイリアシングフィルタを f_{max} でかけることによって図4に示すように使用可能最高周波数を f_{max} までとしている。

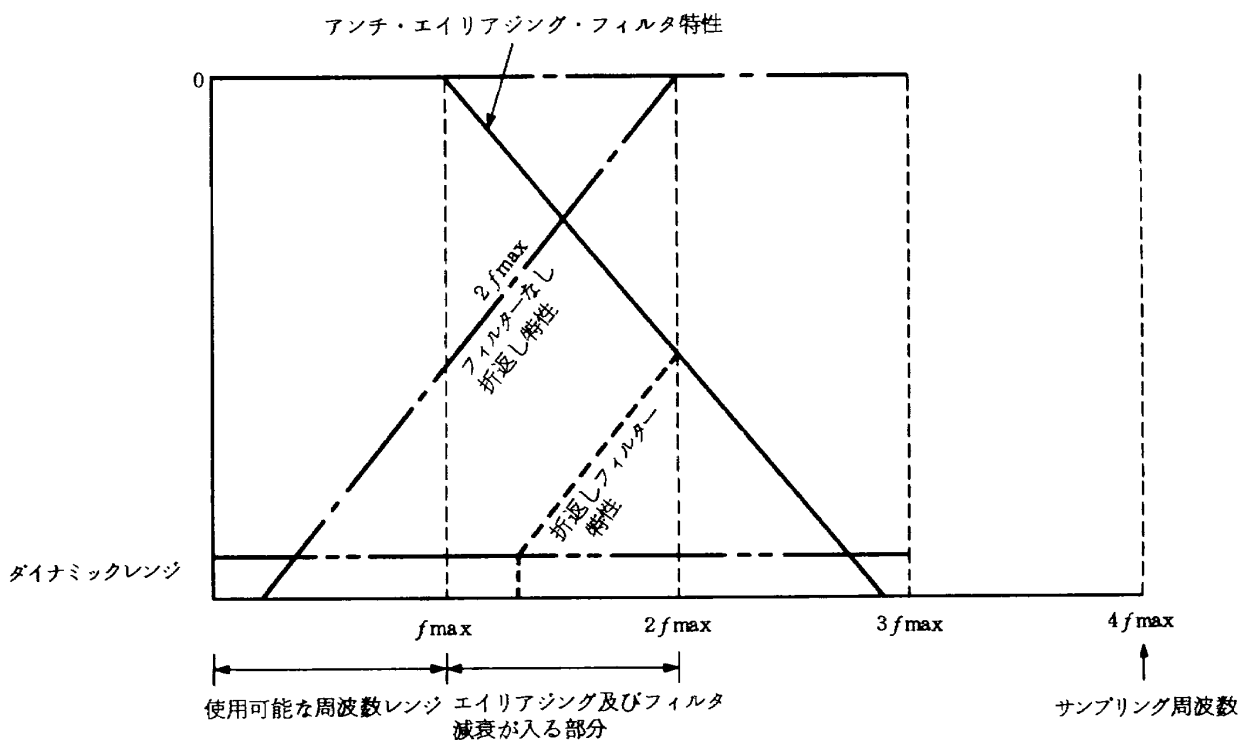


図4 サンプリング周波数に対する使用可能周波数

4-2 スペクトルの推定誤差

定常 (コルゴード的) ガウス過程の $\{x(t)\}$ のパワースペクトルは、厳密に

$$G(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \{ |X(f, T)|^2 \} \quad (7)$$

で与えられる。

ただし

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} df \quad (8)$$

しかしこのような極限と期待値をとる操作は現実には不可能であり、とりあえず K 番目における $G_K(f)$ の推定値は

$$\hat{G}_K(f) = \frac{2}{T} |X(f, T)|^2 \quad (9)$$

$$= \frac{2}{T} (X_R^2(f, T) + X_I^2(f, T)) \quad (10)$$

のように求められる。ここで $X_R(f, T)$, $X_I(f, T)$ は、各々 $X(f, T)$ の実数部と虚数部であり互いに独立なガウス性確率変数とする。よって推定量 $\hat{G}_K(f)$ の各周波数は、自由度 2 の χ^2 分布になる。自由度 n の χ^2 分布の平均値と分散⁽⁵⁾は、 n および $2n$ で示され、これを用いたスペクトル推定の標準誤差 ϵ_r は、

$$\epsilon_r = \frac{\sigma \{ \hat{G}_K(f) \}}{\hat{G}_K(f)} = \sqrt{\frac{2n}{n^2}} = \sqrt{\frac{2}{n}} \quad (11)$$

となる。よって ϵ_r は、(11) 式に自由度 $n = 2$ を代入すれば $\epsilon_r = 1$ となり、推定量の標準誤差は 100 % となり一般にこのような誤差は受け入れられない。そこで ϵ_r を減少させる方法として時間領域平滑化、周波数領域平滑化あるいはこの両方を並用する方法など考えられる。これらの平滑化方法は、(7) の期待値をとる操作の近似と考えることができる。第 1 の方法は、観測時間 T の信号を q 個の信号 $x_i(t)$, ($i = 1, 2, 3, \dots, q$) に分割し、それぞれ推定値 $\hat{G}(f, T/q)$ の和を求め分割個数 q で割ることにより平均を取るものであり、分析バンド幅を $B_e = 1/T_q$ とすると、全分析データ長 T は、

$$T = q T_q \quad (12)$$

となり、この場合の自由度 $n = 2 B_e T = 2 q$ の χ^2 分布とる。よって標準誤差は

$$\epsilon_r = \sqrt{\frac{2}{n}} = \sqrt{\frac{2}{2q}} = \sqrt{\frac{1}{q}} \quad (13)$$

となる。また有効分析バンド幅 B_e は、

$$B_e = \frac{q}{T}$$

となる。第 2 の方法は、スペクトル有限帯域の白色雑音であれば、 $1/T$ 間隔で求められた周波数スペクトル推定量は無相関と考えられ、したがって推定量 $\hat{G}(f, T)$ の任意の周波数の近くの l 個の周波数成分の和は、自由度 $n = 2l$ を持った χ^2 変数となり、その標準誤差は、

$$\epsilon_r = \sqrt{\frac{2}{n}} = \sqrt{\frac{2}{2l}} = \sqrt{\frac{1}{l}} \quad (14)$$

となる。また有効分析バンド幅

$$B_l = l/T \quad (15)$$

となる。このことは、 l と q が等しい場合 $G_0(f)$ は、同一推定量とみなせる。またこの二つの並用によって平滑化する方法を採用すると自由度 $n = 2lq$ の χ^2 変数となりその標準誤差は

$$\epsilon_r = \sqrt{\frac{2}{n}} = \sqrt{\frac{2}{2lq}} = \sqrt{\frac{1}{lq}} \quad (16)$$

と算出できる。有効分析バンド幅は

$$B_e = \frac{lq}{T} \quad (17)$$

となる。以上の平滑化法をふまえて我々が実際に音や振動のスペクトルを求める場合の統計的精度は、そのスペクトルの真の値の近傍に測定値がおさまる確率を推定することである。この確率を信頼限度といい、その誤差範囲は一般に信頼区間 α と呼ばれる。そこでスペクトルの信頼範囲⁽⁶⁾は、次のように示される。

$$\frac{n \hat{G}(f)}{\chi^2 n, (\alpha/2)} \leq \hat{G}(f) \leq \frac{n \hat{G}(f)}{\chi^2 n, (1-\alpha/2)} \quad (18)$$

ただし、 $n = 2 B_e T$

通常、音の分析は、dB 表示で示されるから (18) 式は、

$$\begin{aligned} 10 \log \frac{n \hat{G}(f)}{\chi^2 n, (\alpha/2)} &\leq 10 \log \hat{G}(f) \\ &\leq 10 \log \frac{n \hat{G}(f)}{\chi^2 n, (1-\alpha/2)} \end{aligned} \quad (19)$$

のように表現できる。(19) 式より $\alpha = 20$, 10 および 1 % の信頼範囲と自由度との関係を図 5 に示した。これにより明らかに信頼範囲を半分にするには、自由度 n は 4 倍必要である。分析に際し必要な精度があたえられた場合は、図 5 から自由度 n を読み取り、分析処理方法により T を計算し決定すれば良い。

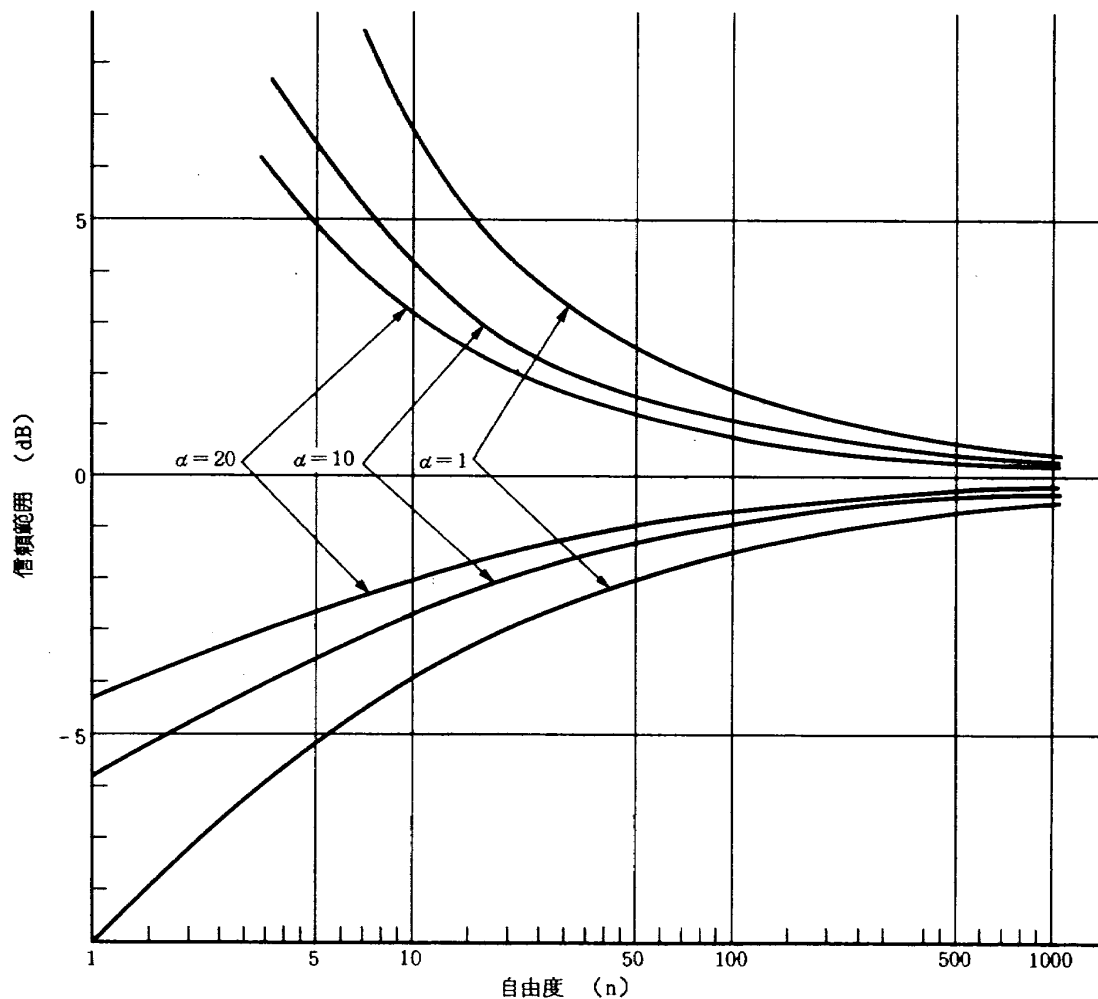


図5 自由度と信頼範囲

5. システム応用例

5-1 パワースペクトル

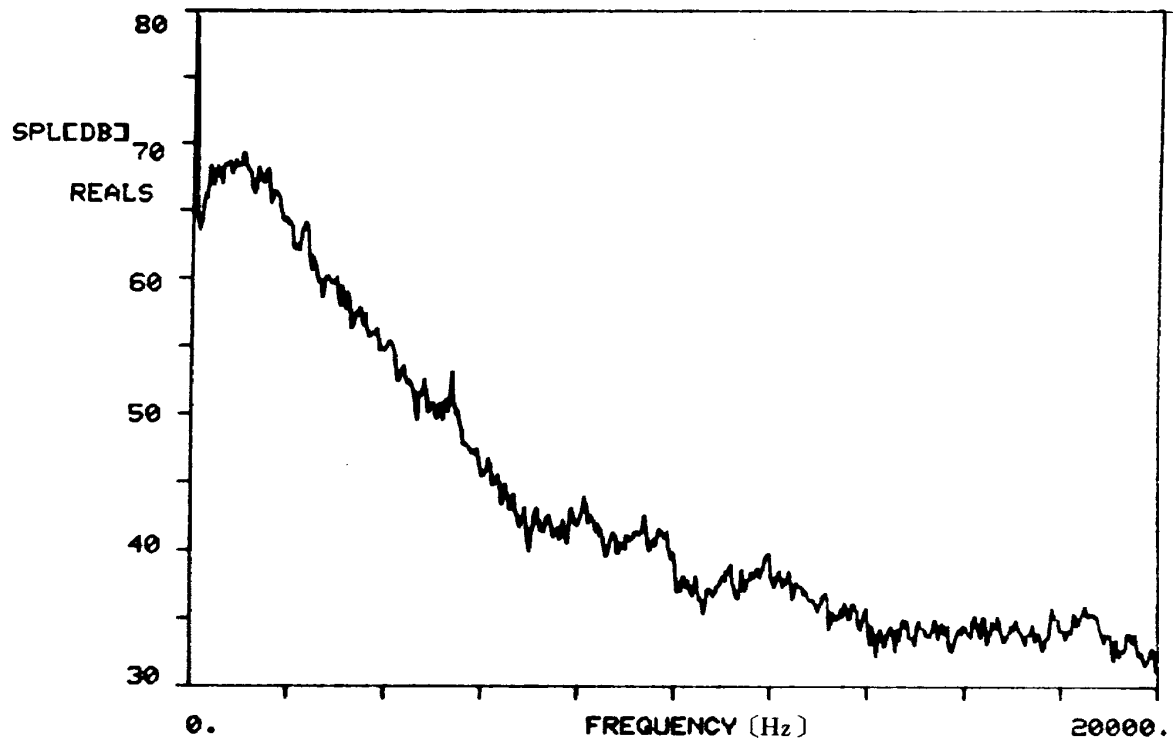
パワースペクトルの測定は、騒音評価する場合必要不可欠である。ここでは、ジェット騒音のスペクトル測定に応用⁽⁷⁾した例について述べる。測定は無響室内(5×5×5m)で行ない、ノズル中心から1.5mの半径上でジェット軸を含む水平面に10°間隔でマイクロホン8点を固定し、同時2チャンネルをスキヤナで切替一周期8点を分析処理した。処理結果の一例としてジェット主流方向から20°での20Hz狭帯域、1/3及び1/12オクターブバンド・スペクトルを図6、7、8に示した。この際の1/3オクターブバンド・スペクトルリストは表7のようになる。同一騒音データを用い処理したこれらの図から明らかに、実験対象により分析処理方法を選択することにより、発生音源と周波数の関係をより正確に解明することができ、騒音低減化を進める上で有効な音源対策を行なうことが可能となる。また航空機騒音評価値PNL dBで整理したジェット騒音の指向性を図9に示す。

表7 1/3オクターブバンド音圧レベルリスト

** NAL * 1/3 OCTAVE **

TEST ID : JET NOISE TEST 1980-6-30 JA0131-
REC NO. : 1
CHANNEL : 11 ID : 20
OVERALL : 86.52 (DB)

FREQ (HZ)	BAND LEVEL (DB)	SIGMA (DB)
20.	71.58	1.076
25.	74.95	1.024
31.5	76.68	.4389
40.	75.88	1.043
50.	72.52	.7374
63.	67.34	.8144
80.	64.01	.6419
100.	63.58	.5084
125.	63.31	.5067
160.	63.99	.4631
200.	64.17	.4639
250.	68.05	.6416
315.	68.8	.6237
400.	70.5	.6471
500.	72.08	.6657
630.	73.09	.2984
800.	74.99	.6114
1000.	75.67	.5792
1250.	75.89	.2271
1600.	75.89	.4661
2000.	74.43	.7476
2500.	72.8	.6523
3150.	71.28	.9109
4000.	68.67	.8028
5000.	65.63	.6831
6300.	61.02	.5418
8000.	58.64	.3634
10000.	56.81	.4576
12500.	55.49	.629
16000.	53.43	.4091



**** NAL * AUTO SPECTRUM **** REC NO. = 2
 TEST ID : JET NOISE TESET 1980-6-30 JA0101-
 CHANNEL = 11 ID : 20
 OFFSET = 30. OVERALL = 87.09

図6 狭帯域音圧スペクトル ($\Delta f = 20\text{Hz}$)

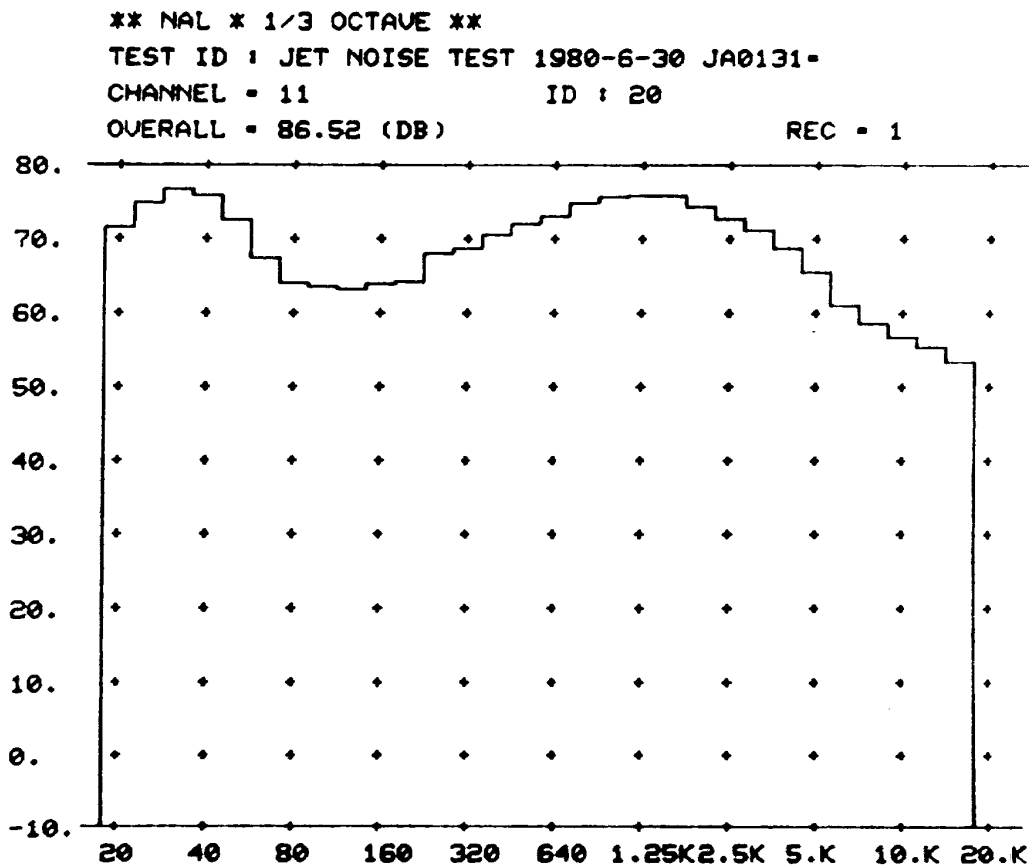


図7 1/3 オクターブバンド音圧スペクトル

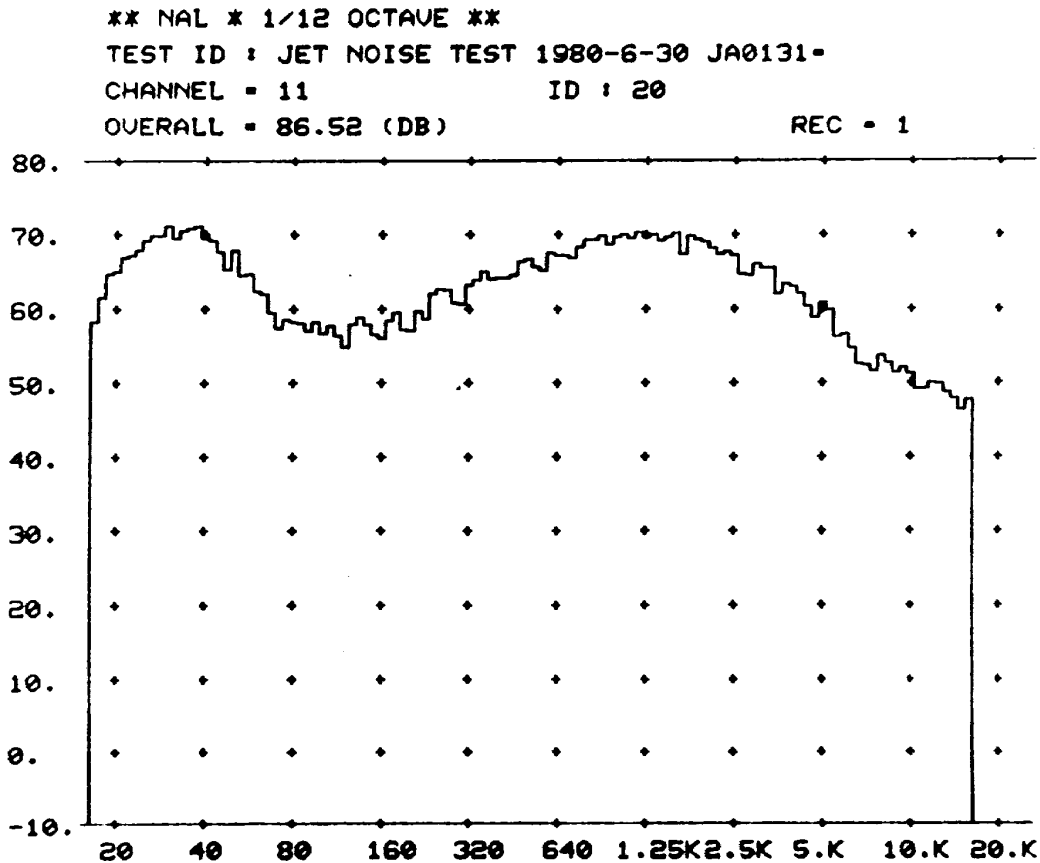


図8 1/12オクターブバンド音圧スペクトル

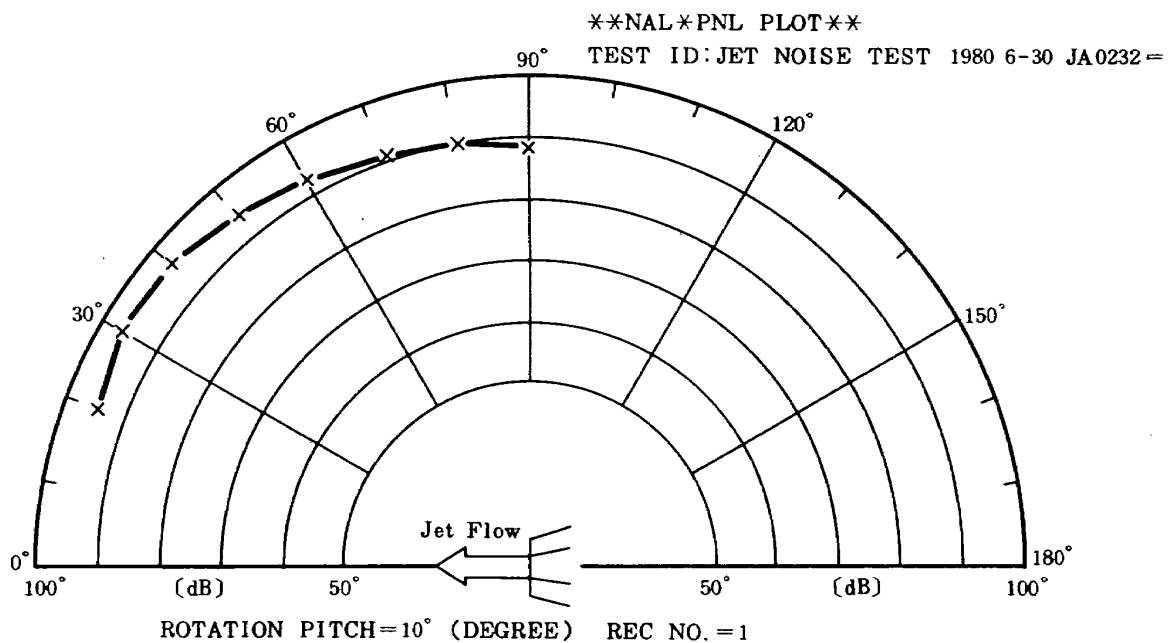
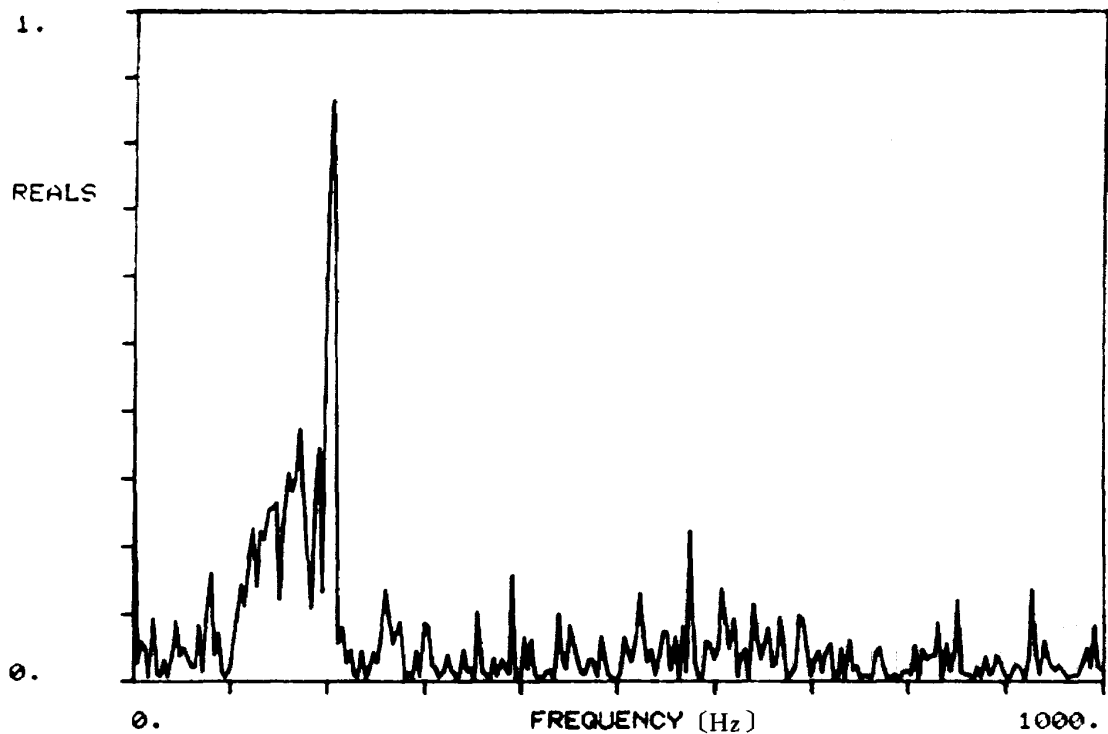


図9 モデルジェットの感覚騒音レベル

5-2 音源の推定

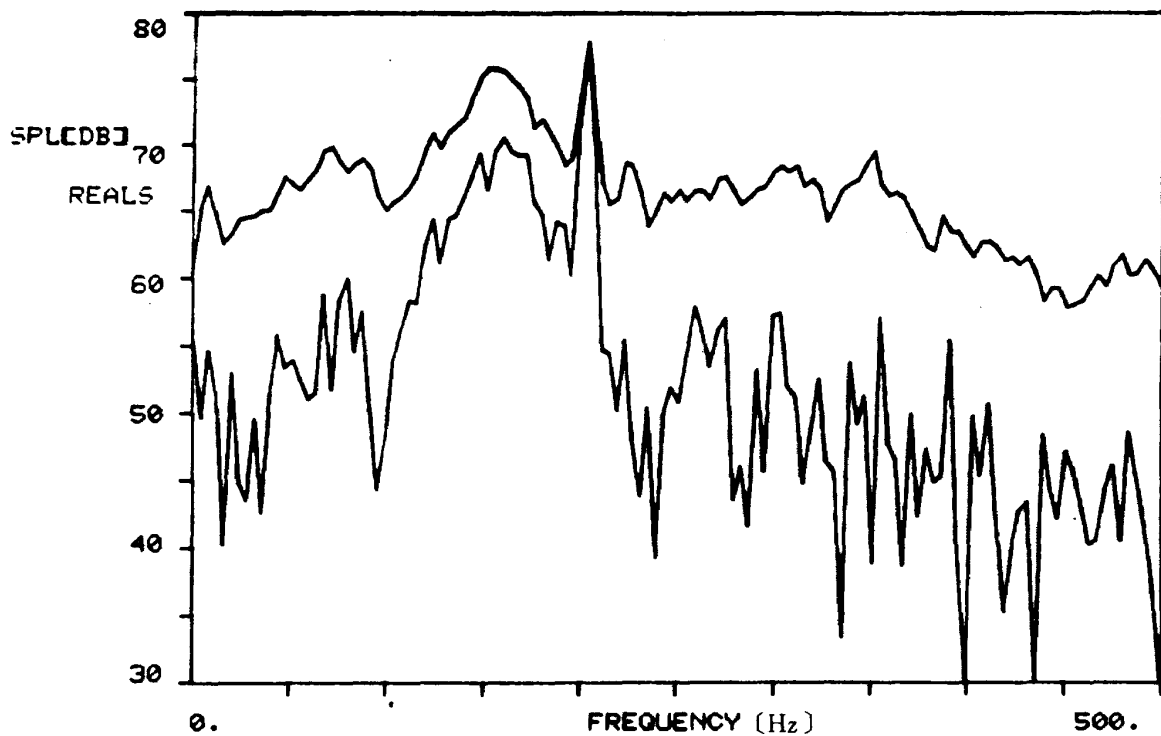
ファンエンジン音源として、ファン、圧縮機、タービン、燃焼器及びジェットなど考えられる。これらの音源がどの程度遠距離場音圧レベルに寄与しているかを知ることが、エンジン騒音低減化を図るためには重要なことである。そこでコア騒音⁽⁸⁾（燃焼そのものに起因する

騒音、燃焼によって発生した速度変動や温度変動がタービンと干渉して発生する騒音、ノズルリップからの渦発生による騒音などを含んでおり、1KHz以下の周波数を言う）が、遠距離場音圧レベルにどの程度寄与しているかを調べる必要がある。図10にエンジン燃焼器出口壁に取りつけたマイクロホンの音圧と遠距離場マイクロ



REAL ** NAL * COHERENCE FUNCTION ** EXP. NO.=EXP-1-4
 TEST ID:FJR710/20 ENGIEN NOISE TEST 1978-10-14 (C 1,302)
 MEAS. POIT NO.=FMM,B4(2)PRM= 4120(RPM)

図 10 燃焼器出口壁面音圧と遠距離場音圧との
コヒーレンススペクトル



REAL ** NAL * POWER SPECTRUM ** EXP. NO.=EXP-1-4
 TEST ID : FJR710/20 ENGIEN NOISE TEST 1978-10-14 (C 1,302)
 MEAS. POIT NO.=FMM,B4(2)RPM= 4120(RPM) ATT.=100.
 OFFSET = 30. OVERALL = 82.93 OURALL1=89.59
 RESOLUTION=2.491 HZ FRAM COUT=30 REF. LEVEL=.07768

図 11 遠距離場音圧とコヒーレンスより求めた
コア音圧の比較

ホンの音圧とのコヒーレンスの測定結果を示す。明らかに周波数が200 Hzにおいて遠距離場でのコア騒音の計算値と遠距離場マイクロホンでの音圧レベルの比較を図11に示したが、200 Hzの周波数近傍ではコア騒音が強く影響していることが明らかとなった。このようにして、本システムの多元的利用により音源分離と寄与率が推定可能となる。

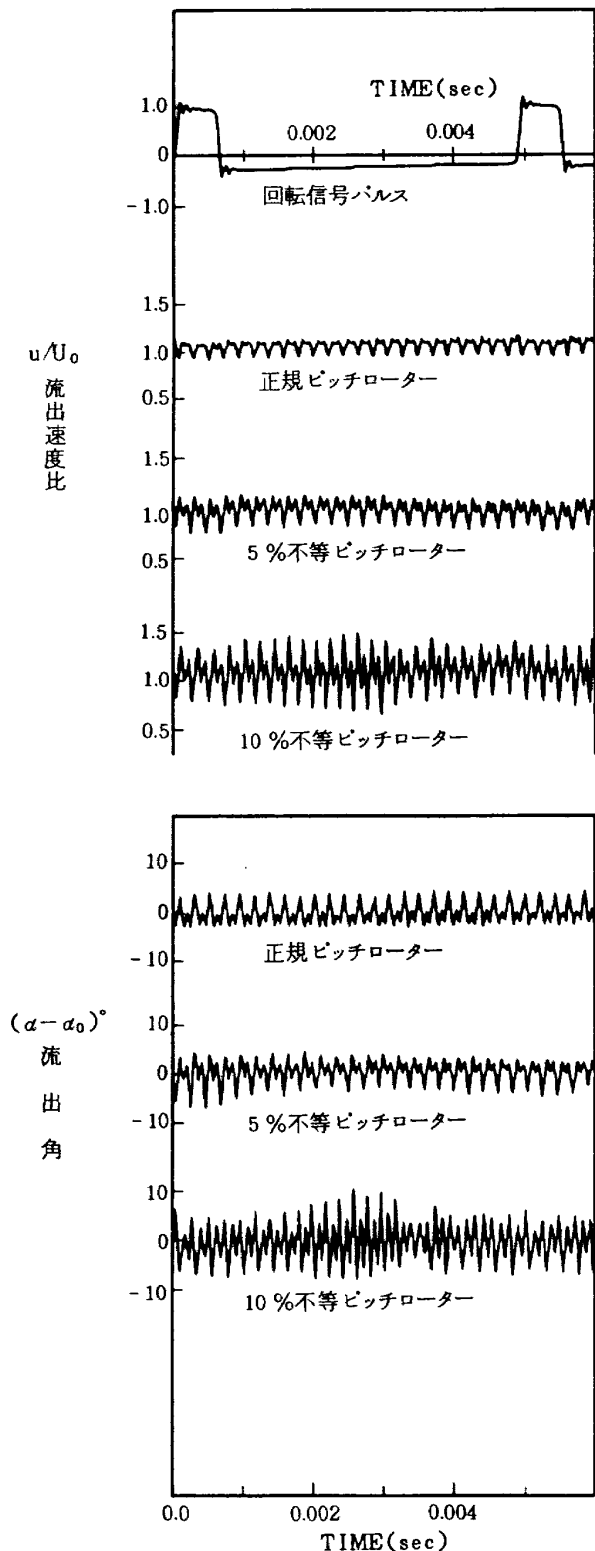


図12 流出速度比，流出角の変動

5-3 時間領域分析

ファンエンジンのファン騒音を低減化する目的で、ファン動翼の周方向ピッチを不等⁽⁹⁾にし、等間隔および等間隔に対する不等幅を5%と10%にした場合の3者につき翼通過周波数の発生に起因するウェークを調べた。時間領域分析を行なった例について示す。X型の熱線流速計の信号をファン動翼回転に同期させ加算平均し、回転に基づく成分のみを取り出し、本システムにより時間領域分析を行った。このように回転パルス(1回転1パルス)に同期をかけることにより、ターボ機械の動翼後での流出速度、流出角の変動をとらえる事ができる。この結果を図12に示す。

6. 結 論

設計、製作した騒音実験オンライン解析システムの機能と概要及び応用例を中心に述べてきたが、本システムの採用により次のような成果が得られた。

(1) 従来の方法(実験データを多チャンネルデータレコーダに記録し、その後再生処理する方法)に比べ実験時間、処理時間とも飛躍的に短縮できた。このため実験遂行に必要なデータの検討を現場で行い、次のステップに進むことができた。

(2) 測定時間と信頼範囲を明らかにし、必要な精度をうる最低の時間(T)を見出し、プログラム上で設定可能とした。

(3) 応用面については、限られた二、三の例について述べるにとどめたが、ソフトプログラムを自由に作ることにより更に広範な応用に使用できる。

終りに、本システム製作に協力頂いた東京エレクトロン(株式会社)の坂本見恒氏に深く感謝する次第である。

引 用 文 献

- 1) Time/Data Company; Time Series Language Programming Manual, TSLR-31, 1923.
- 2) FAR-PART 36 Appendix B, (1969).
- 3) Time/Data Company; Programming Manual ACE2CH (2736-5035).
- 4) Time/Data Company; Programming Manual TSLDIS (2936-5000).
- 5) 近藤, 舟版; 技術者のための統計的方法, 共立出版, p.53 ~ p.54.
- 6) Julius S. Beudat & Allan G. Piersol; Random Data: Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons, Inc., pp. 191 ~ 192.
- 7) 西脇, 武田, 藤井, ファンエンジン排出側用低騒音, 高効率ノズル方式, 日本機械学会講演論文集,

1980年8月.

- 8) 武田, 渡辺; コヒーレンス関数を用いたファンエンジン FJR/710 の騒音測定, 日本音響学会講演論文集, 昭和 54 年 4 月.
- 9) 藤井, 西脇, 武田; 不等ピッチで高速回転するファンの音響特性と空力性能, 航技 TR-526, 1977 年 2 月.

付録 1 時系列言語 TSL

TSLのプログラム要素は、表A-1に示されるように、プログラム作成および修正、入出力指定、ブロック定義、制御文、スペクトル計算、一般ブロック計算およびエレメント計算がサブルーチン化され、それぞれ全て名前が付けられている。これらの名前は、6文字以内のアルファベットと数字の組合せで、先頭は必ずアルファベットを使用する。

表 A-1 TSL 標準ステートメント

<u>プログラム作成、修正</u>		<u>入出力</u>	
PSTAB	サブルーチンテーブルのプリントアウト	LOAD	入力指定
CLEAR	ユーザサブルーチンの全削除	OSPEC	出力指定
XREF	サブルーチン名の登録	END	入出力停止
CREATE	サブルーチン作成の宣言	HOLIN	1バイト入力
EDIT	サブルーチン修正宣言	HOLOOT	1バイト出力
LIST	サブルーチンリスト	HINPUT	文字入力判定
SAVE	サブルーチンの補助記憶への出力	INPUT	数値入力
DELETE	サブルーチン	PRINT	文字列出力1
REMARK	コメントラインの宣言	WRITE	文字列出力2
RENUM	ステートメントナンバーの付けかえ	FORMAT	出力形式指定
RENAME	サブルーチン名の変更	ERASE	画面クリア
PACK		BEAMP	画面上の表示座標指定
		VFCTOR	画面上直線作図
<u>ブロック定義</u>		<u>制御文</u>	
BLKCLR	ブロック登録削除	F O R }	ループ
BLKDEF	ブロック定義	N E X T }	
BIBSET	BIBの書き込み、読み出し	GOTO	ジャンプ
<u>スペクトル計算</u>		GOSUB	サブルーチンジャンプ
D F T	フーリエ変換	RETURN	サブルーチン終了
I F T	逆フーリエ変換	I F	各件判定ジャンプ
ASPEC	自己スペクトル	A R G	引数のテスト
CSPEC	相互スペクトル	L I N K	指定アドレスへのジャンプ
<u>一般ブロック計算</u>		<u>エレメント計算</u>	
ZERO	データ0代入	L E T	代入
M O V E	ブロックコピー	S U M	加算
STCONR	実数代入	D I F	減算
STCONC	複素数代入	P R O D	乗算
ADCONR	実定数加算	Q U O T	割算
ADCONC	複素定数加算	T R A N	バイト操作
A D D	ブロック加算	B I T M	ビット操作
S U B	ブロック減算	C E T }	スタック操作
N E G	-1を乗算	P U T }	
MLCONR	実定数乗算	S T A C K	
MLCONC	複素定数乗算		
M U J	供役複素数乗算		
D I V	ブロック割算		
M U L	ブロック乗算		
S Q R T	ルート計算		
L O G	ログ計算		
E X P	べき計算		
D I F F	微分		
I N T G	積分		
C O S	コサイン計算		
S I N	サイン計算		
F L O A T	整数実数変換		
F I X	実数整数変換		
F I X R C	実数複素数変換		
A B S R	実数絶対値		
A B S C	複素数絶対値		
P O L A	複素数偏角		
C O N J	共役複素数		
R E A L	複素数実部		
I M A G	複素数虚部		
C O M P L X	複素数作成		

付録2 分析処理モジュール (NAL 2) 及び表示モジュール (NAL 3) のフローチャート

B0

B1

** NAL NOISE MEASUREMENT APPLICATION **
** ANALYSIS PROGRAM **

TEST ID?

B0(3) ~ (12) ID Max 39 文字入力

NUMBER OF MEASUREMENT ?

I0 ← 入力

NUMBER OF AVERAGE ?

I1 ← 入力

ANALYSIS FUNCTION ?

I2 ← 入力

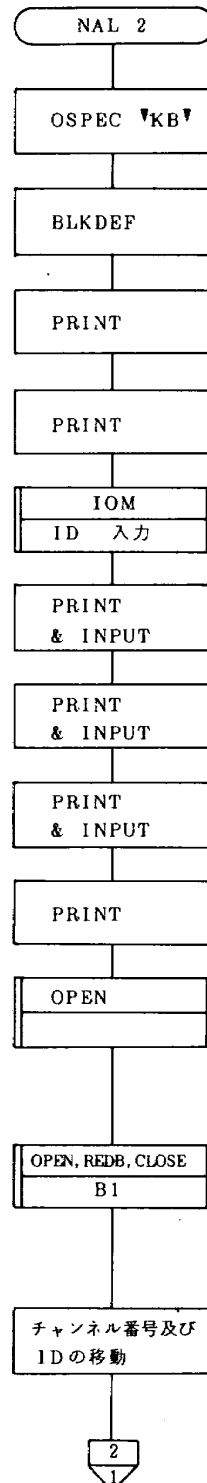
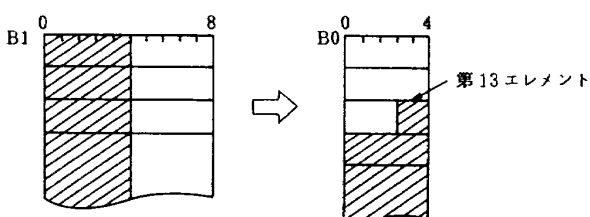
DATA FILE NAME ?

新規登録

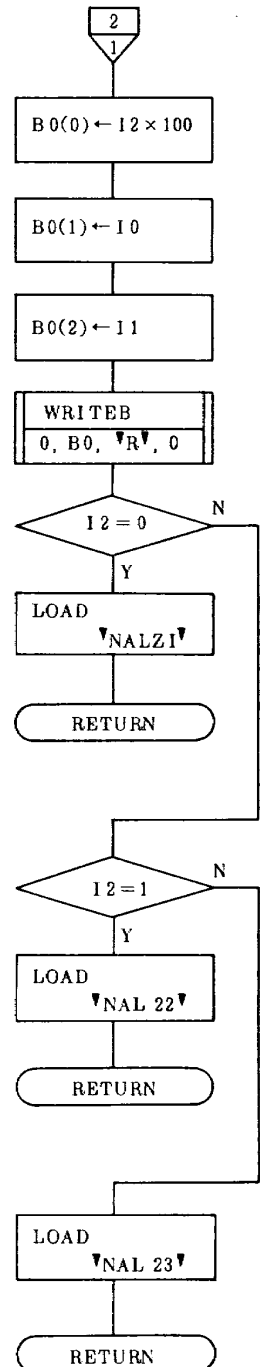
I2 = 0	APS	→	レコード長 = 1024 W
1	OCTAVE	→	256 W
2	TRANSFER	→	1024 W

CHNL DAT の該当レコード入力

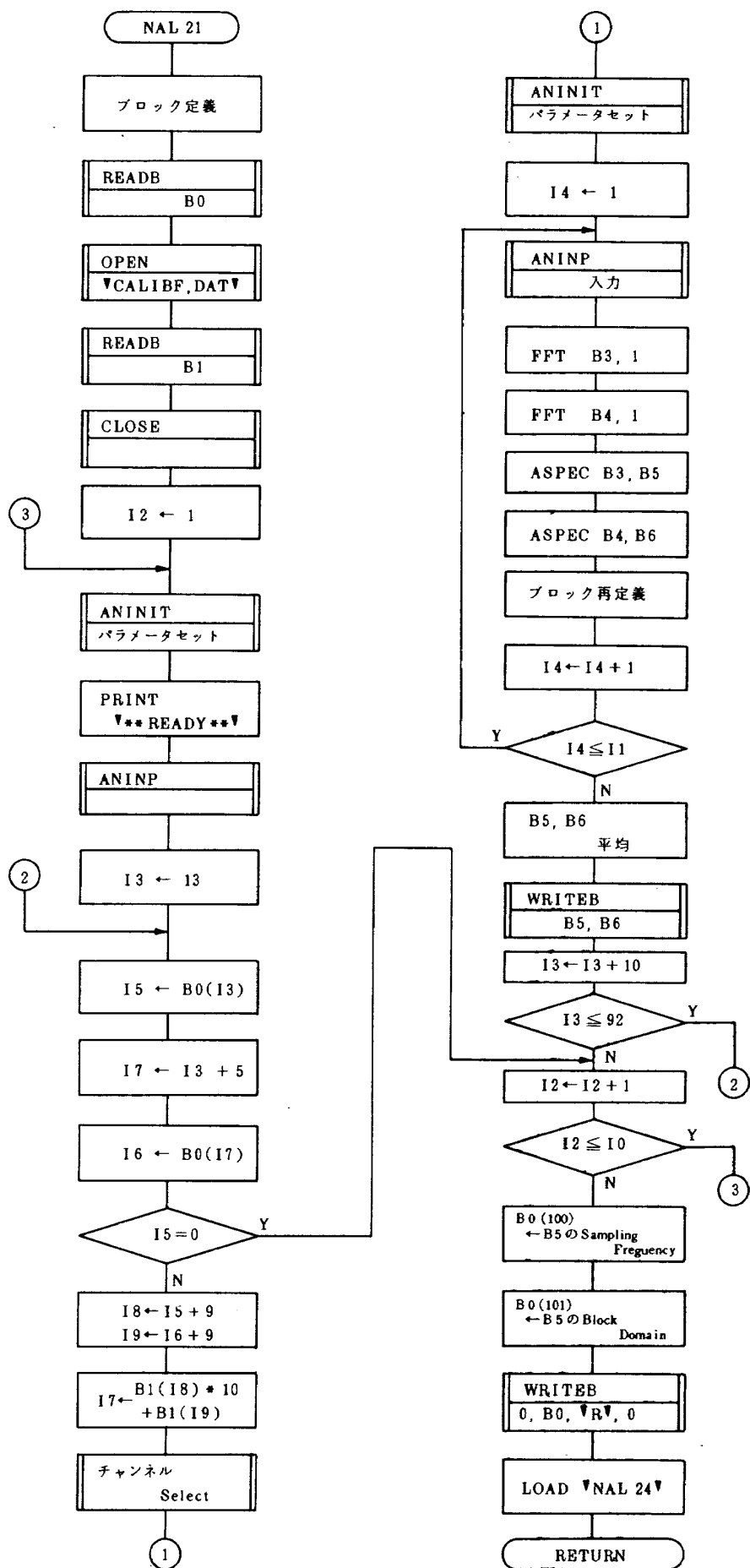
I2 = 0	→	レコードアドレス = 0
1	→	1
2	→	2



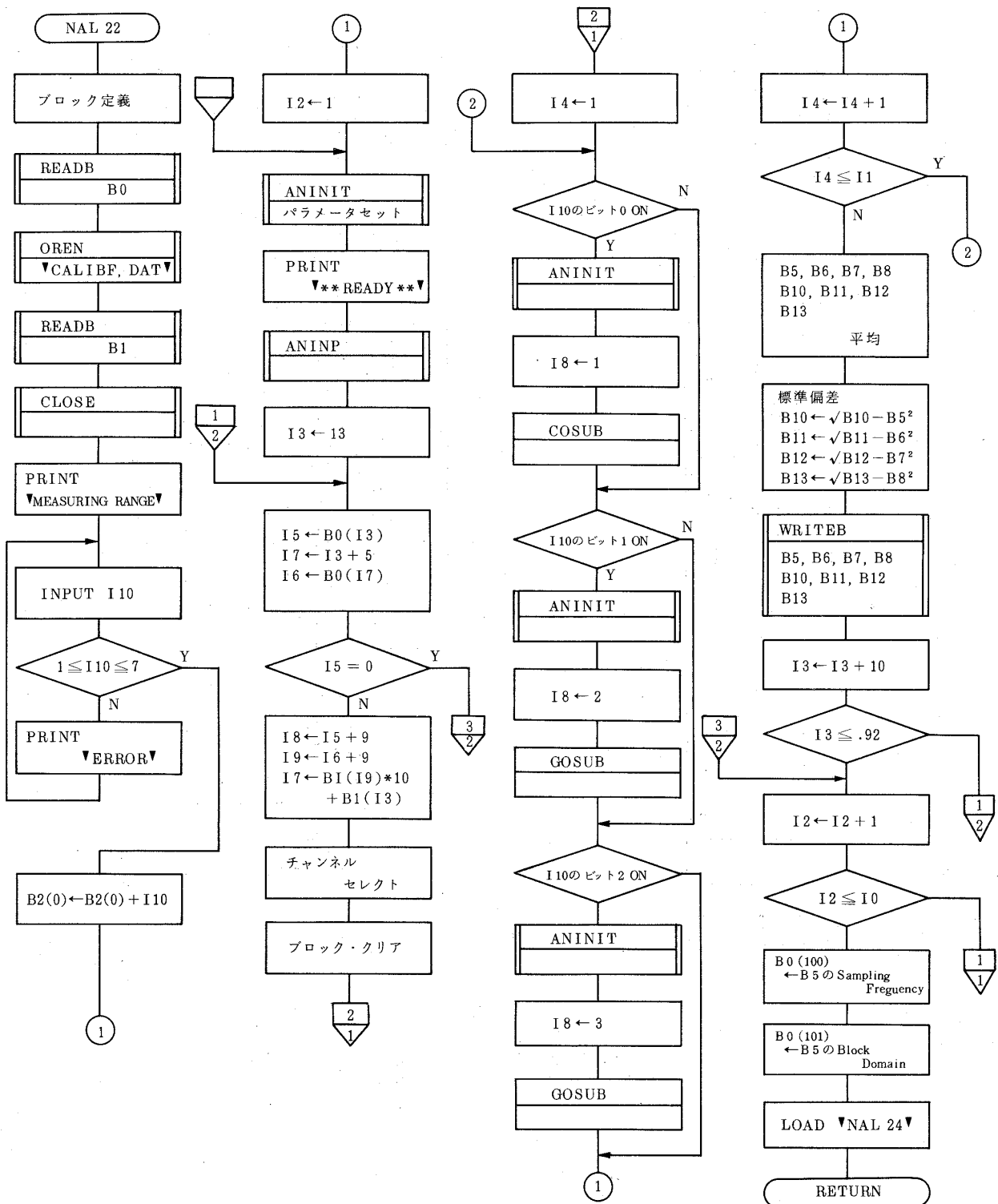
100 = APS
200 = OCTAVE
300 = TRANSFER



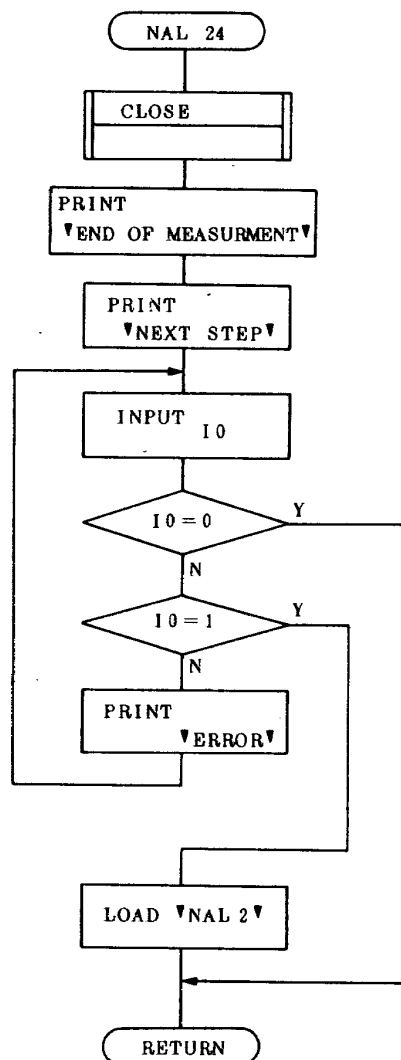
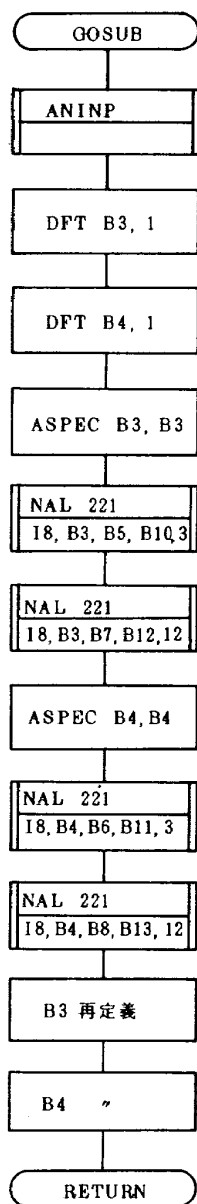
NAL2 フローチャート



NAL 2 フローチャートの2

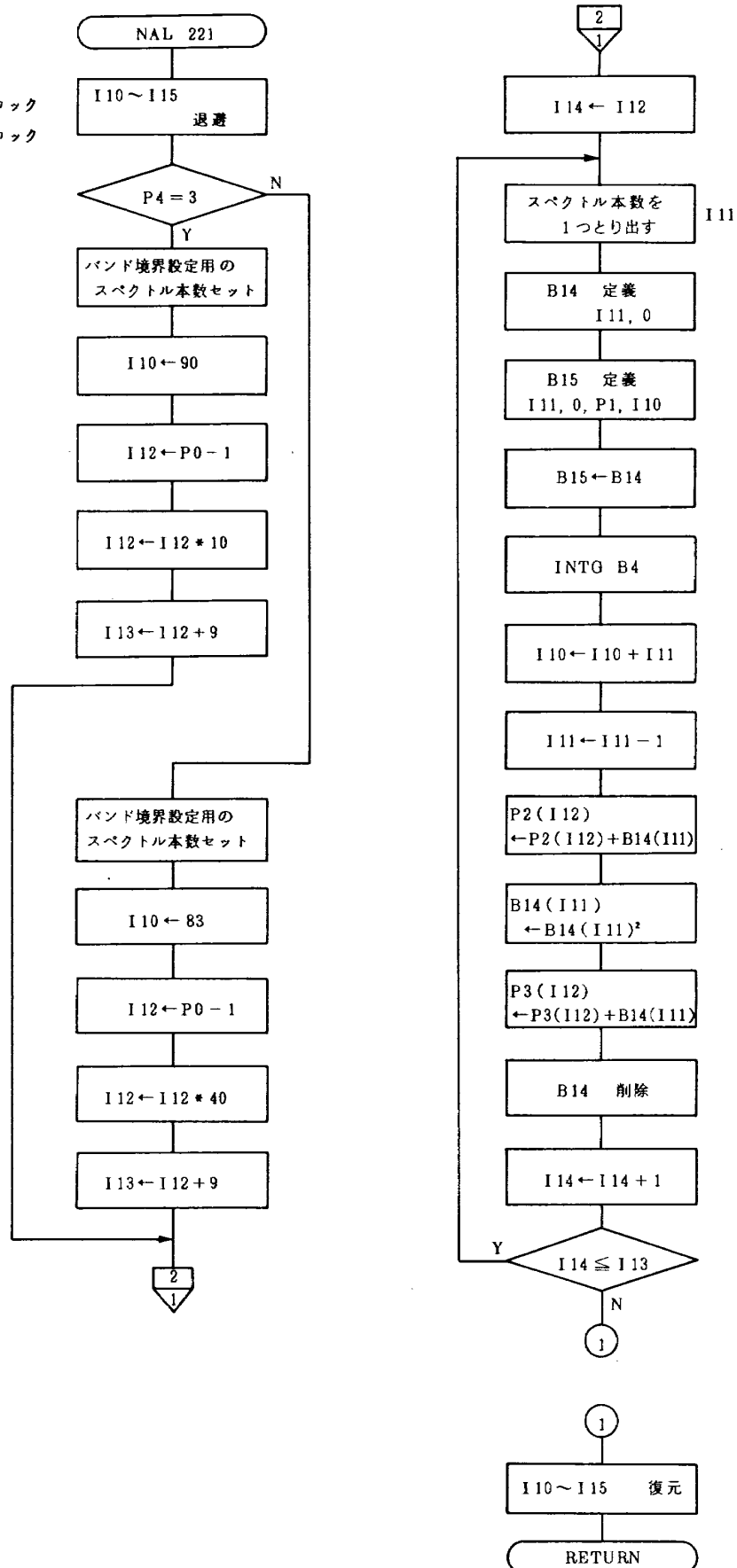


NAL 2 フローチャートの3

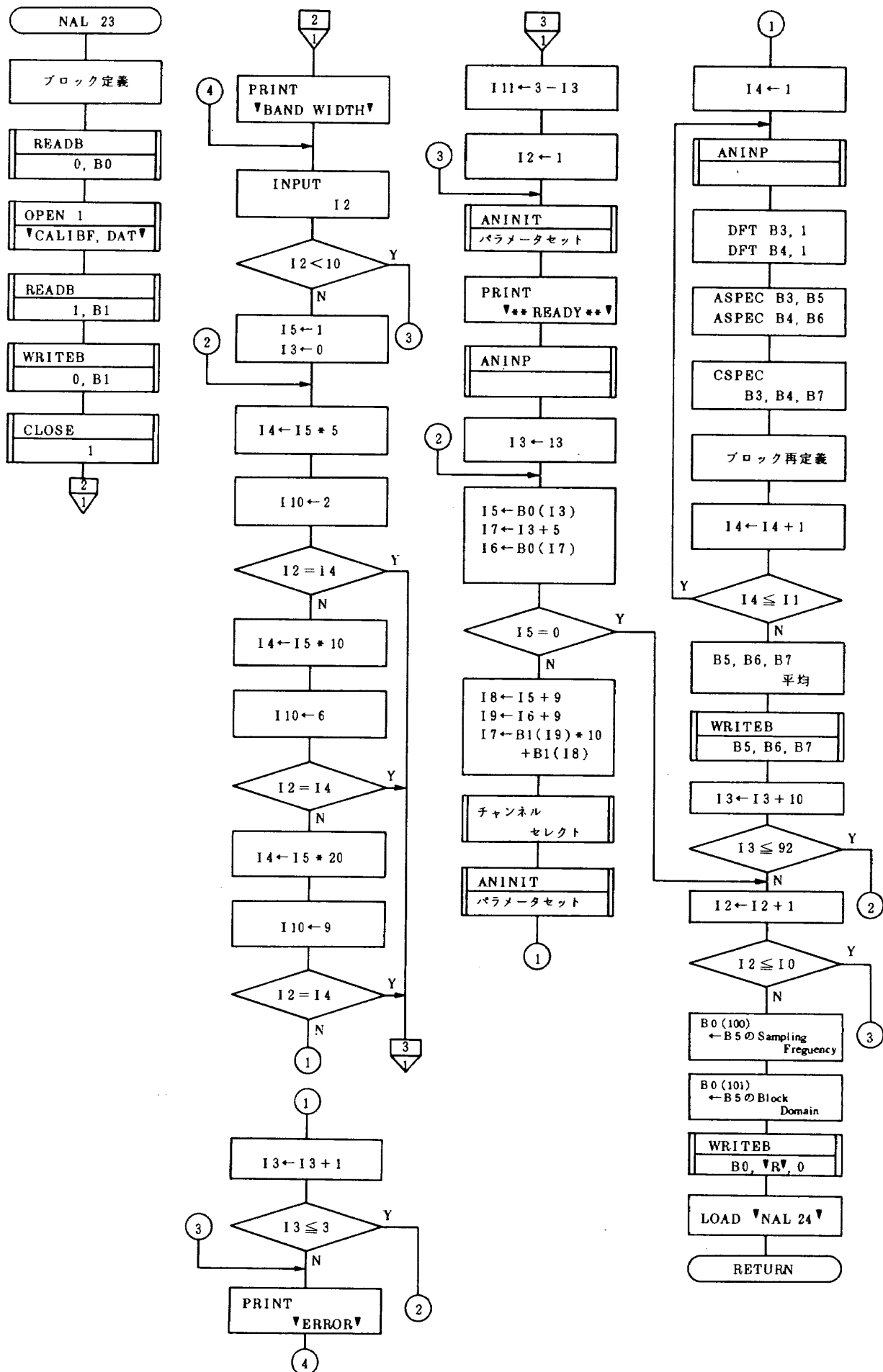


NAL 2 フローチャートの 4

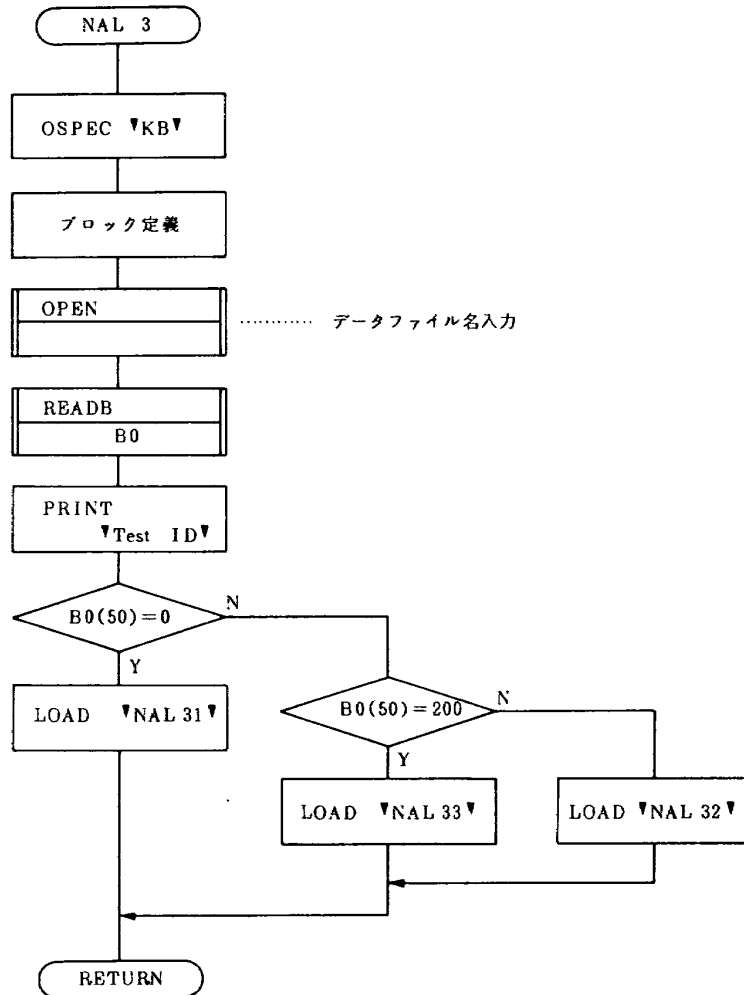
P0: レンジ番号 (1, 2, 3)
P1: ソースブロック
P2: 1/3 又は 1/12 オクターブ用ブロック
P3: " 2 乗用ブロック
P4: コート { 3 = 1/3 オクターブ
 12 = 1/12 オクターブ



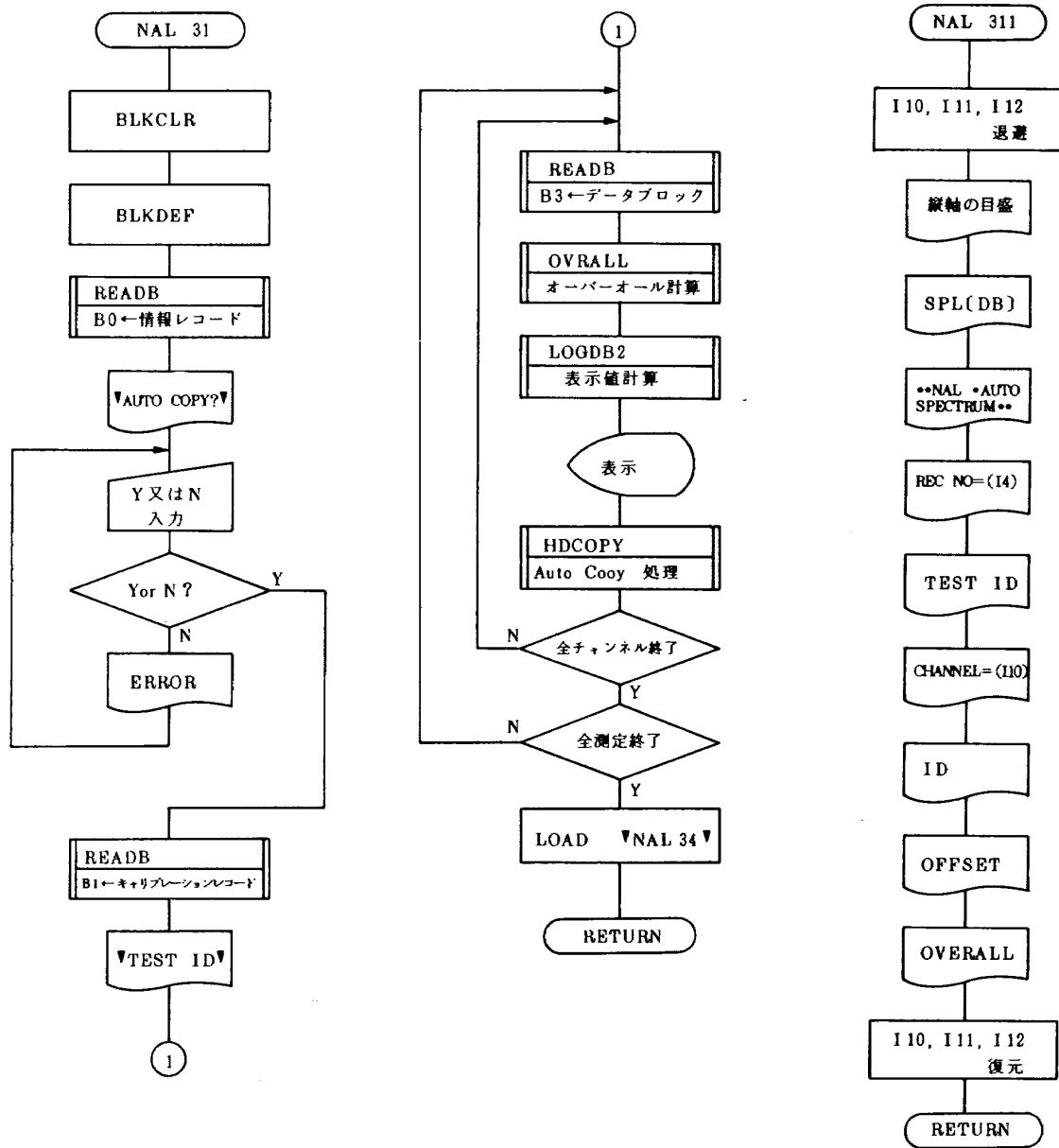
NAL 2 フローチャートの 5



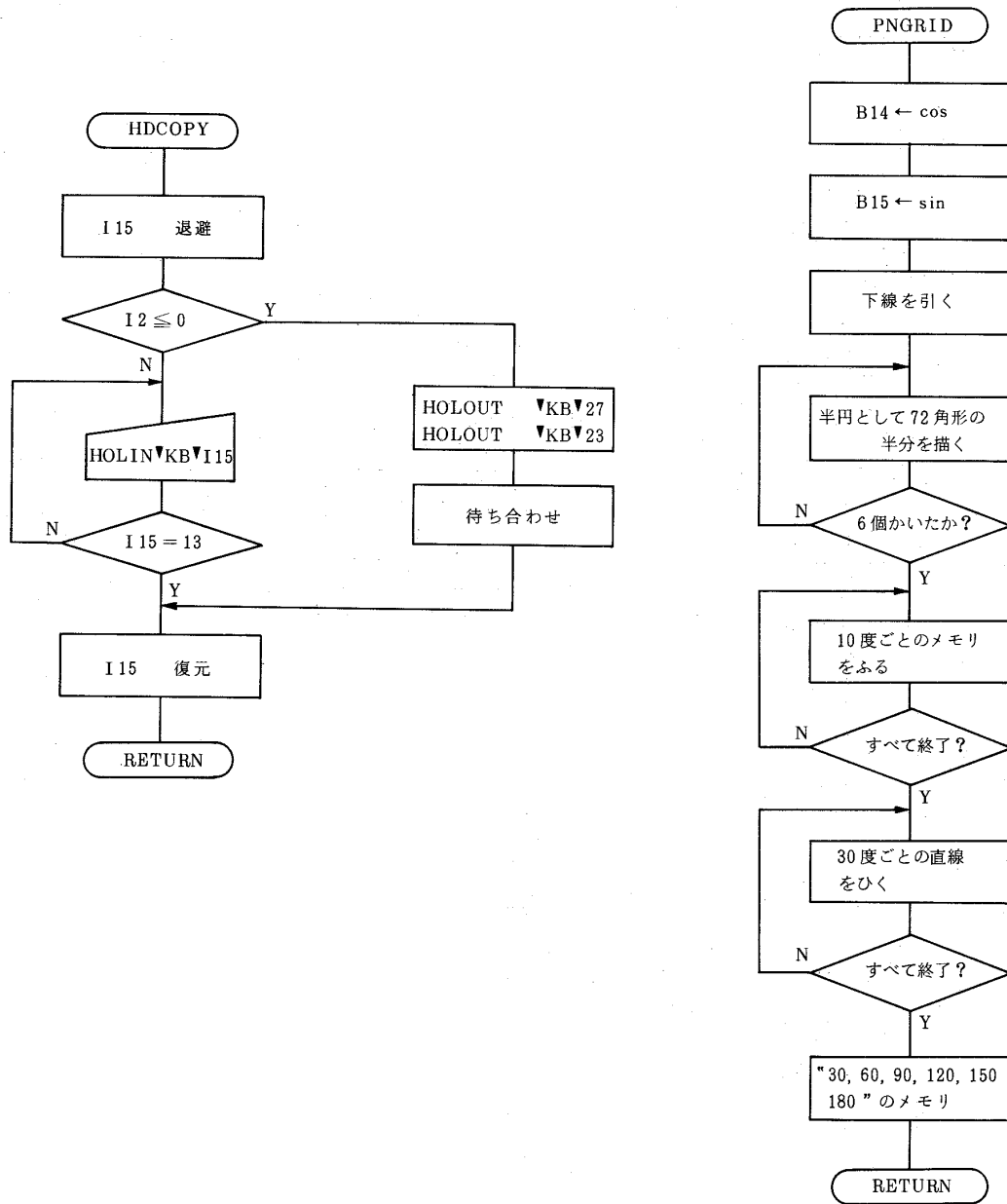
NAL 2 フローチャートの6



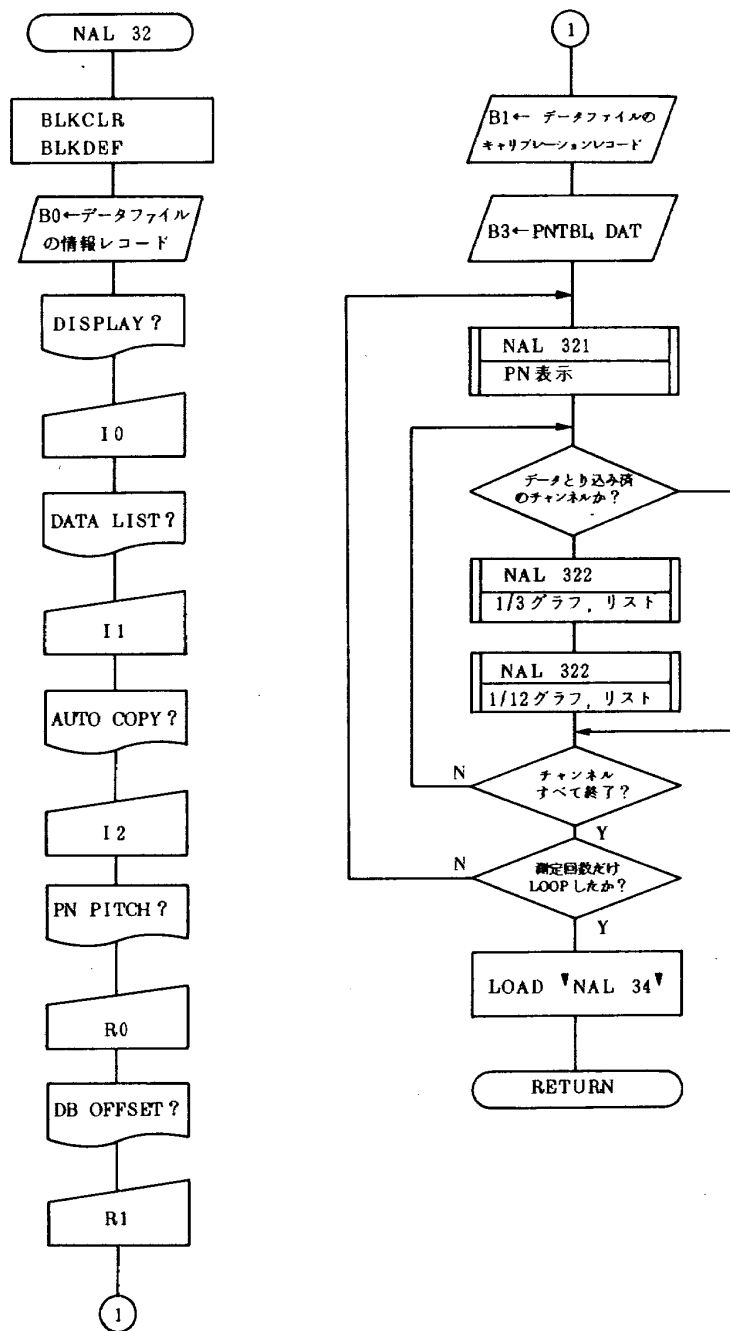
NAL3 フローチャート



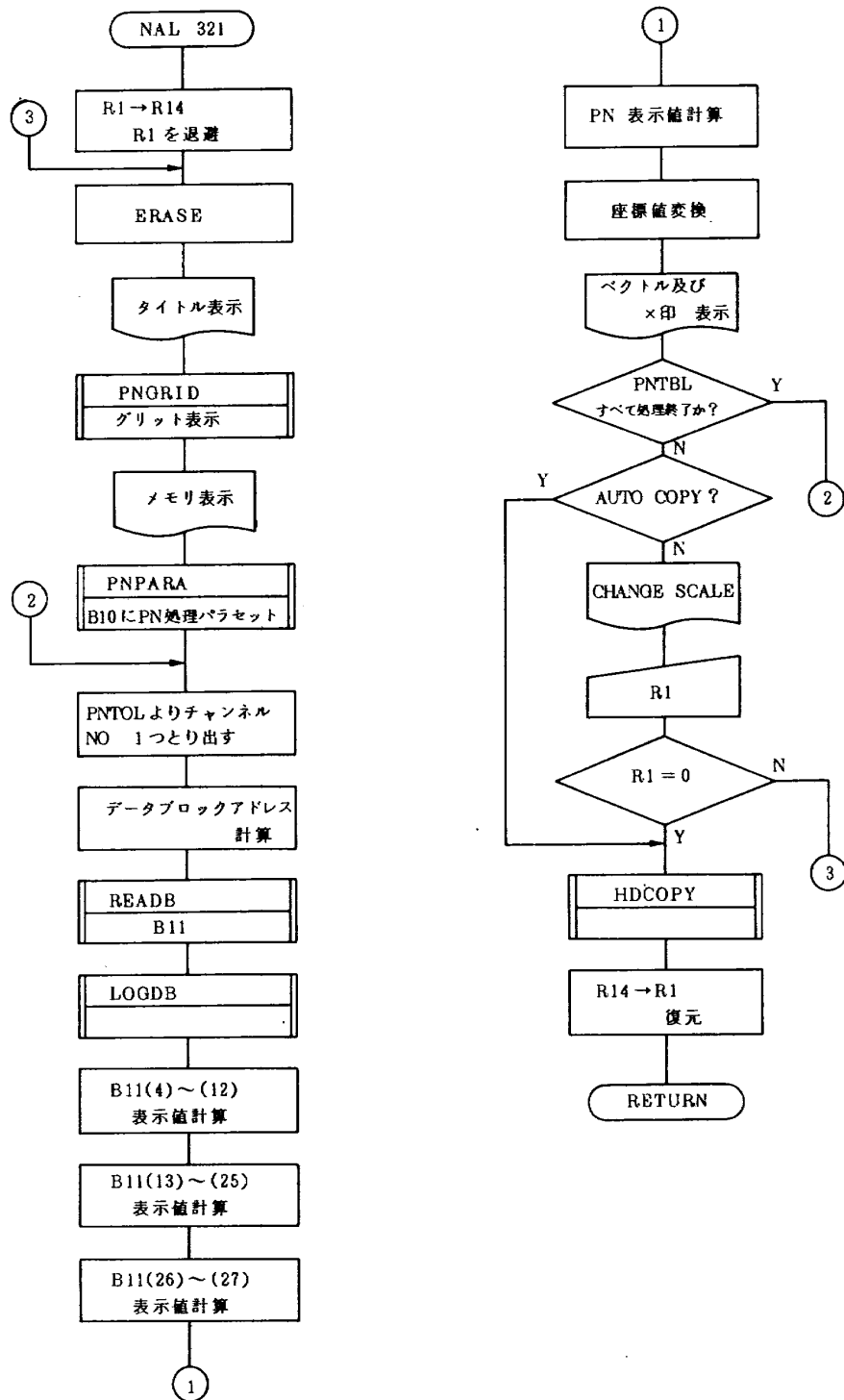
NAL 3 フローチャートの 2



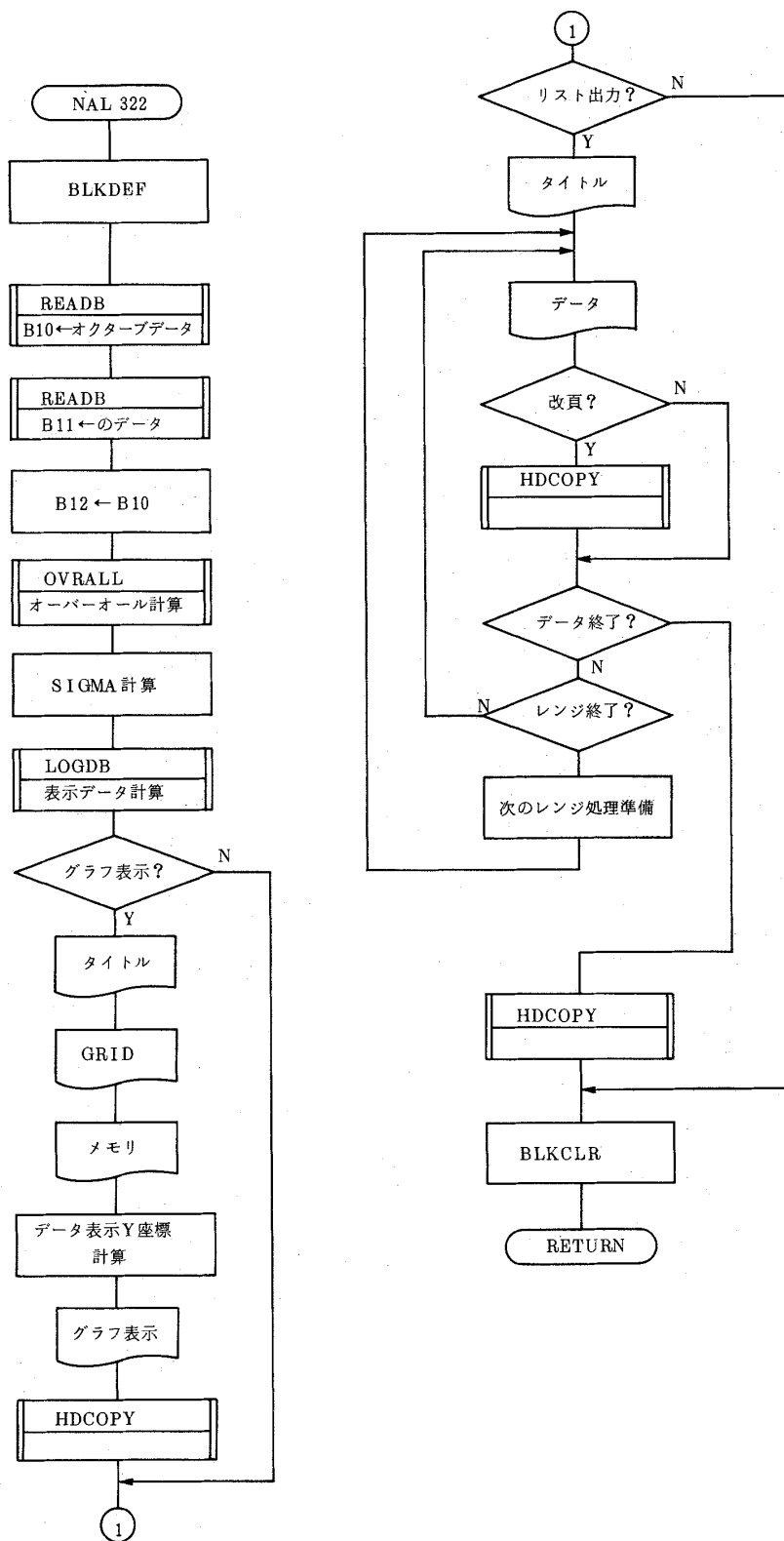
NAL3 フローチャートの3



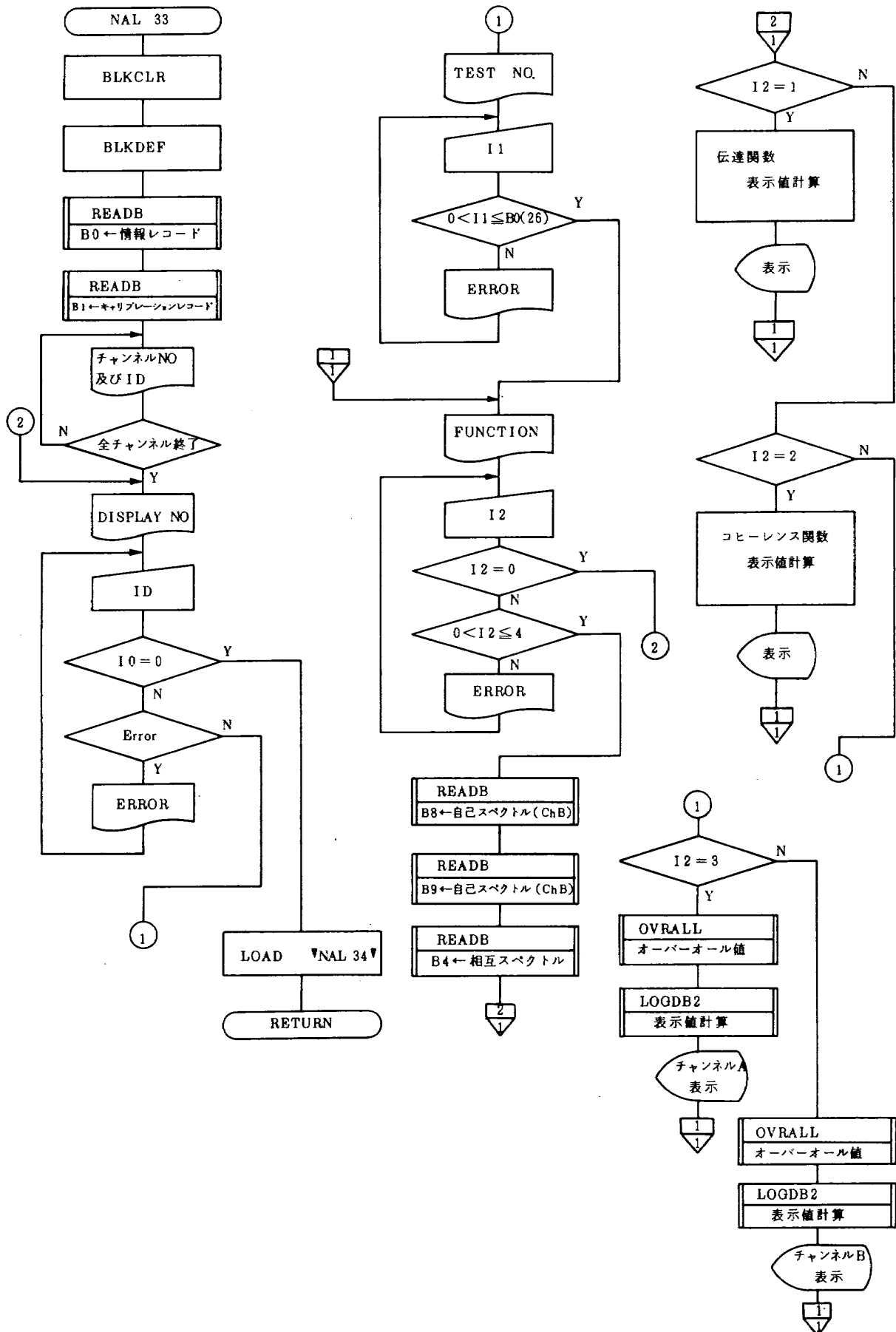
NAL 3 フローチャートの 4



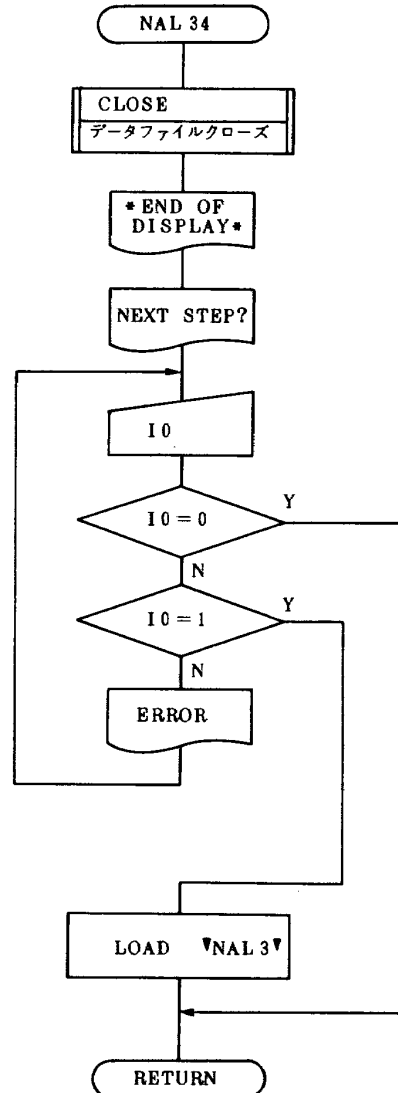
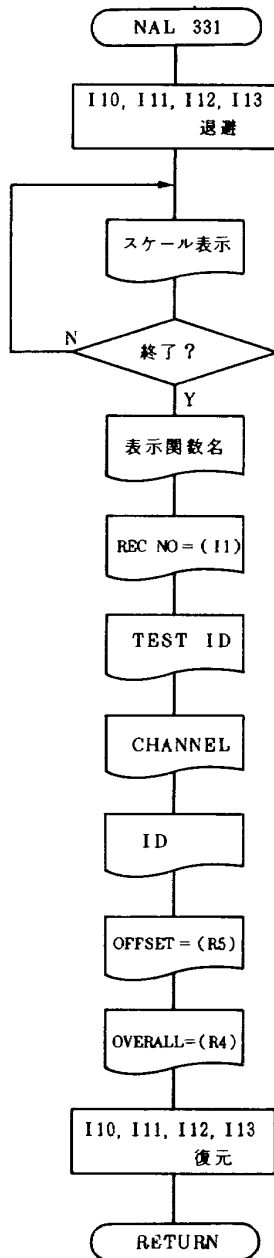
NAL 3 フローチャートの5



NAL 3 フローチャートの 6



NAL 3 フローチャートの 7



NAL 3 フローチャートの8

航空宇宙技術研究所資料 428 号

昭和 55 年 12 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)㊎182

印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2 - 27 - 12

Printed in Japan