

IV-7 スケジュール作成ソフトウェア (KASER)

吉野 泰造* 小池 国正*

(昭和59年7月3日受理)

1. はじめに

VLBI というものが一種の天文観測の形態をとり、複数局で天体の進行に同期した観測を長時間にわたり行っていくものである以上、実験を行う前には観測局、ソース、時刻等の必要なパラメータをすべて決定して宇宙電波源からの信号を手順に従い受信、記録していく必要がある。このためのスケジュール作成者の負担は大変なもので、VLBI の実験に関する広範囲な分野についての理解が必要である。各アンテナのマウント形式とその駆動性能に始まり、観測機器の構成、雑音温度、本ソフトウェアの出力形式の自動運用ソフトウェア (KAOS: 本特集号 II-13) に対する整合性に対する認識は欠くことができない。このような、さまざまな制約条件の中でなす最良のスケジュールを作り出す最適化問題は早くから叫ばれているが、実用に耐えるものはまだ現われていない。現状では N. Vandenberg⁽¹⁾らの開発した会話型 VLBI スケジュール作成プログラム (SKED) が実用に供されている。K-3 では SKED をベースに、使用されているカタログをデータベース化し、ソース位置の体系を他の K-3 プログラムと一致させ J2000.0系に統一した "KASER" (VLBI ソースとして使用される QUASAR: 準星にちなんで命名された) プログラムを完成させた。

2. VLBI スケジュールの考え方

実験スケジュールは一般にその目的により様相を変えるものである。VLBI の場合も基線長の推定、時刻同期、地球回転の観測、電波源マッピング用観測など、それぞれに適したスケジュールというものは自ずから異なってくる。いずれの場合も、どのような要素を決定すればよいか、第1表(a)に、また制約条件を第1表(b)にあげた。以上は大きくわけて、観測局、ソース、時間に関するパラメータである。しかし、それぞれ独立に扱えるものではなく相互にからみ合っている。観測局については特に、移動局を除けば既に建設されている局の選択だけが自由であり、他はほとんど動かさない。また VLBI に適

第1表 (a) VLBI スケジュールのためのパラメータ

アンテナ直径
偏 波
システム雑音温度
受信帯域
周波数チャンネル
記録帯域幅
アンテナ配置
使用電波源
観測時間
実験時刻 (観測時刻)

(b) VLBI スケジュールの際の制約

アンテナ駆動速度
ケーブル ラップ
混 信
低 E1 の障害物
Mutual Visibility

したソースは、強度と構造の両者を満足させると非常に限定される。これはスケジュール問題をやさしくする方向に働いている。

さて、スケジューリングはある目的に対して目的関数 (評価関数) を設け、パラメータの適当な設定により関数値の最大 (または最小) 化を図るものである。このような手法として従来よりよく使用されるものに線形計画法⁽²⁾がある。線形計画法は、(1)~(3)のように定式化される場合には有力な解法が用意されている。

$$z = z_0 + \mathbf{c}\mathbf{x} \quad \longrightarrow \text{最小化} \quad \dots\dots(1)$$

z : 目的関数

z_0 : 定数項

$\mathbf{c} = [c_j], j \in N$: 係数ベクトル, n 次の行ベクトル

$\mathbf{x} = [x_j], j \in N$: 変数 x_j からなる n 次の列ベクトル

$$x_j \geq 0 (j \in N_i) \quad \dots\dots(2)$$

$$\mathbf{a}_i \mathbf{x} \geq \mathbf{b}_i (i \in M_i) \quad \dots\dots(3)$$

\mathbf{a}_i : 係数行列の第 i 行ベクトル

\mathbf{b}_i : 条件式の右辺ベクトル要素

しかし、ある時刻の星の選択の例に端的に現われるよう

* 鹿島支所 第三宇宙通信研究室

陸間 VLBI のスケジューリングで非常に大きな制約であり、他の制約と異り技術的に解決しえないものである (ソースの構造、位置も同様であるが)。その影響を見るため、日本、米国、欧州の各1局として鹿島、Haystack、Bonn からの Mutual Visibility を調べてみる。各局の位置は第2表に示した。また各局の EI の下限を h_0 ($h_0: 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$) とする。

- i) 鹿島の地方恒星時 (LST) が0時における (γ が鹿島で南中)、各局の可視域を赤道座標系内に変換してその共通領域を見る。
 - ii) i) でプロットした可視域を鹿島の地平座標に変換して共通領域を Az, El で捕らえる。
- i) の手順

x, y, z 軸回りの θ の回転行列を $p(\theta), q(\theta), r(\theta)$ とおくと⁽⁹⁾

$$p(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad \dots\dots(5)$$

$$q(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad \dots\dots(6)$$

$$r(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots(7)$$

であり、また

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{A,h} = \begin{pmatrix} \cos h_0 & \cos A \\ -\cos h_0 & \sin A \\ \sin h_0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots(8) \quad \begin{matrix} A: Az \\ h_0: El \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\alpha,\delta} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \cos \alpha \\ \cos \delta & \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad \dots\dots(9) \quad \begin{matrix} \alpha: \text{赤緯} \\ \delta: \text{赤経} \end{matrix}$$

とおけば、地平座標から赤道座標へは(10)式で変換される。

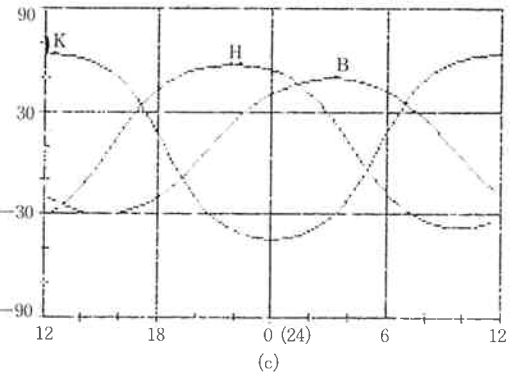
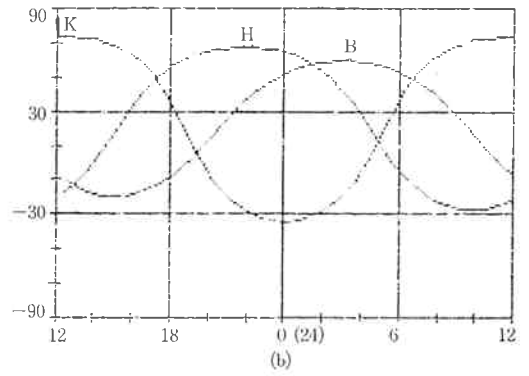
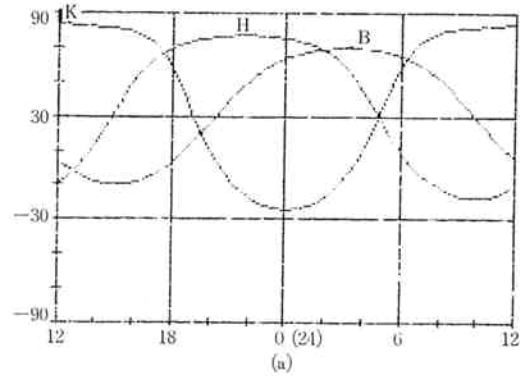
$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\alpha,\delta} = r(-LST) q\left(-\frac{\pi}{2} + \varphi\right) r(-\pi) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{A,h} \quad \dots\dots(10)$$

この結果

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) \quad \dots\dots(11)$$

ただし

$$\begin{aligned} X &= -\cos(LST) \sin \varphi \cos h_0 \cos A \\ &\quad - \sin(LST) \cos h_0 \sin A + \cos(LST) \cos \varphi \sin h_0 \\ Y &= -\sin(LST) \sin \varphi \cos h_0 \cos A \\ &\quad + \cos(LST) \cos h_0 \sin A + \sin(LST) \cos \varphi \sin h_0 \\ \delta &= \sin^{-1}(\cos \varphi \cos h_0 \cos A + \sin \varphi \sin h_0) \quad \dots\dots(12) \end{aligned}$$



第3図 相互可視域 (K: 鹿島, H: Haystack, B: Bonn; 横軸 (α), 縦軸 (δ))
(a) $h_0=30^\circ$ のとき (b) $h_0=20^\circ$ のとき
(c) $h_0=10^\circ$ のとき

これをプロットしたのが第3図である。3局で同時観測を行ったとすると図から、 δ の最小値として $h_0: 10^\circ$ の時でも赤緯として 30° は相互可視の為に必要となる。この条件でよく使われる POLARIS ソース⁽¹⁰⁾ (第3表) から選択すると、総数14の内、ちょうど半分当たる7つのソースだけに絞られてしまう。大気補正、混信の問題から EI の限界をどこにとるか問題であるが、加えて天

第3表 POLARIS ソース (mv:等級, z:赤方偏移)

IAU name	other name	ID	α (2000.0)	δ (2000.0)	fluz 2, 8GHz	mv	Z
0106+013	4C-01.02	QSO	01 08 38.77110	+01 35 00.3192	2. V, 2. V	18.4	2.107
0224+671	4C67.05	e. f.	02 28 50.05197	+67 21 03.0338	0.6 , 0.6V		
0235+164		BL Lac	02 38 38.93021	+16 36 59.2770	1. V, 2. V	15.50V	
0355+508	NRAO 150		03 59 29.74805	+50 57 50.1657	0.2 , 0.4		
0552+398	DA 193	QSO	05 55 30.80611	+39 48 49.1670	3. , 5.	18.0	2.365
0851+202	OJ 287	BL Lac	08 54 48.87509	+20 06 30.6360	0.6V, 1. V	14.5V	
0923+392	4C39.25	QSO	09 27 03.01395	+39 02 20.8495	2. , 4. V	17.86	0.699
1226+023	3C273B	QSO	12 29 06.69970	+02 03 08.5917	2. , 1.	12.86V	0.158
1404+286	OQ 208	Sey	14 07 00.393	+28 27 14.66	0.6 , 1.	14.0	0.079
1641+399	3C345	QSO	16 42 58.80990	+39 48 36.9929	2. , 2.	15.96V	0.595
1642+690		BL Lac	16 42 07.9205	+68 56 39.966	0.5 , 1.	19.2	
2134+004		QSO	21 36 38.58625	+00 41 54.2170	1. , 2.	18.0	
2200+420	VRO 42.22.01	BL Lac	22 02 43.29134	+42 16 39.9832	1. V, 1. V	14.5V	0.070
2251+158	3C454.3	BL Lac	22 53 57.74979	+16 08 53.5656	3. , 0.2.	16.10V	0.859

球上のごく一部だけを使った実験は基線推定でも好ましいものではない⁽⁶⁾。このためグローバルな実験は観測局のゾーン分けをして進められようとしている。

ii) の手順

i) の場合の逆変換となる

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z/A, h \end{pmatrix} = r(\pi) q\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) r(LST) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \alpha, \delta \quad \dots\dots(13)$$

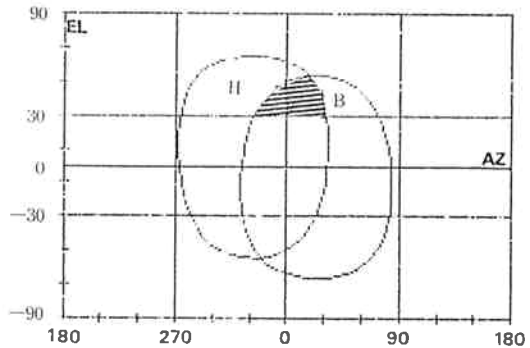
ただし, Haystack と Bonn のデータに対し, LST は鹿島の値を入れる (LST=0^h)

この結果

$$A = \tan^{-1}\left(\frac{\cos\delta \sin\alpha}{-\sin\varphi \cos\delta \cos\alpha + \cos\varphi \sin\delta}\right) \quad \dots\dots(14)$$

$$h = \sin^{-1}(\cos\varphi \cos\delta \cos\alpha + \sin\varphi \sin\delta) \quad \dots\dots(15)$$

h_0 が 30° の場合について直交座標にプロットしたのが第4図である。また第5図には天頂から見た相互可視域を示した。これらの共通領域を見ると国際 VLBI のネットワークが固定化され実用化されると、専用アンテナの駆動範囲、駆動速度への要求がゆるやかになり限定駆動型ですむためコストダウンにつながりうることを示している。また、この方向からの混信のチェックは厳しく行う必要がある。

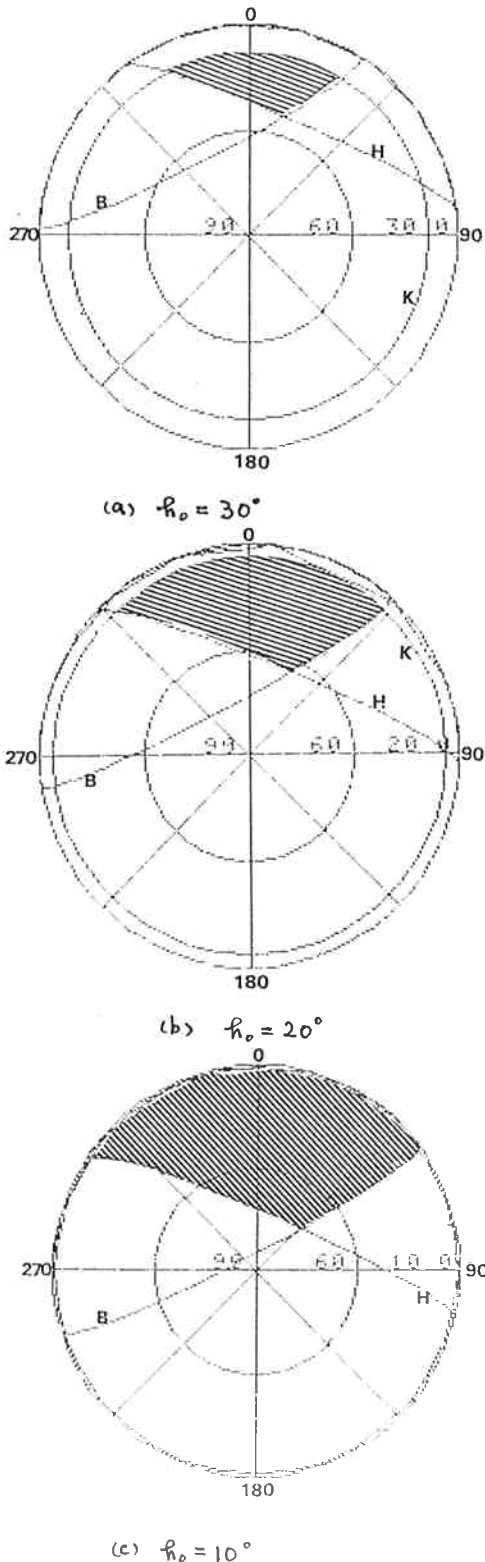


第4図 地平座標(鹿島)における相互可視域 ($h_0=30^\circ$)

3. スケジュールリングの現状と KASER

3.1 オリジナル・スケジュール

K-3 または Mark-III の VLBI 自動運用では SNAP と呼ばれる双方のシステムでコンパチブルなコマンド体系によって構成される実験スケジュールが用いられる⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。しかし各局のスケジュールはシステム構成の若干の違いにより異なったものになっている。そこで、各局の事情にとらわれず、どの時刻にどの星を受けるのか、そしてシステムの設定すべきパラメータを記述したおおもとの表を作成している。これをオリジナル・スケジュールと呼ぶ。そして各局毎の違いはプロシージャと呼ばれる一連の SNAP コマンド列の定義を各局毎に定めておくことで調整している。オリジナル・スケジュー



第5図 鹿島における相互可視域の天頂方向からの図示 (円周方向は北を0とした方位角, 半径方向は仰角)

ルには実験遂行に必要な情報のエッセンスだけ含まれているので、ここに記述されている項目をもってその VLBI 実験に必要な十分な制御パラメータと判断される。そのため、K-3のデータ処理・解析の柱となっているデータベースに新たな実験データを登録する際、最初にその実験の枠組みを規定するためにオリジナルスケジュール・ファイルを利用する (本特集号「IV-3データベースセットアップソフトウェア (KASET)」参照)。第4表にオリジナル・スケジュールの例を示した。構成は“\$”で始まる7つのセクションから成っており各部に一定のフォーマットでパラメータが定義されている。

3.2 KASER の特徴

K-3 では、とすれば複雑さ巨大さ故に混乱しがちな VLBI ソフトに秩序を持たせ統一化を図った。第1に、データベースの採用である。KASER は他の K-3 ソフトと同様に K-3 データベースと結合されている。これにより、必要とされる「観測局パラメータ」、「電波星座標」、「受信周波数セット」が随時、最新の状態で利用できる。新たな観測局を追加していく場合も、変更すべき箇所が多岐にわたらず、誤りがなく便利である。第2に、頻繁に利用する天文演算において国際的に移行中の J2000.0系を用いている。この方針は KROSS, KAPRI (本特集号「III-4 相関器制御・データ収集ソフトウェア (KROSS)」, 「VI-5 アプリオリ・モデル計算ソフトウェア (KAPRI)」参照)と同様である。

さて、VLBI スケジューリングに対し、先に述べたように最適化、自動化の道を求めて研究が続けられているが現段階では実用化されたものではなく、オペレータの経験に基いた会話型のユーティリティが使われている。しかし人手に頼って作られたスケジュールでも既に基線長の推定で cm オーダの議論をなしえている。我々の目標とするところは推定パラメータ間のカップリングをより小さくし、VLBI の能力 (高い観測精度) を極限まで利用した効率のよいスケジュールを作ることである。

それでは、現状のソフトウェアで、計算機は人間に何をしてくれるのか。1つはオリジナル・スケジュールを作る時の助けである。\$PARAM にあるパラメータはデフォルト値を持っているので、必要であれば変更要求を行う。\$SKED セクション作成時には必要な時点でいつでも地平線上で Mutual Visibility のある星を教えてくれる (第6図)。また、各局での星の動き、そして 24 hr の Mutual Visibility 状態を見せることも可能である (第7図)。その他、アンテナ・リミットを無視したり、テープ交換時間の余裕がないといった矛盾入力や太陽近傍の星に対する警告が出される。

他の機能はオリジナル・スケジュールから SNAP ス

第4表 オリジナル・スケジュール

\$EXPER JAPAN 2

\$PARAM←観測パラメータ情報

DURATION 380 IDLE 0 CALIBRATION 30 LOOKAHEAD 1200 MINIMUM 60

CHANGE 420 MODULAR 10 LENGTH 8550 FREQUENCY SX ELEVATION 9.9

PREOB PREOB MIDOB MIDOB POSTOB POSTOB SYNCHRONIZE ON

SUBNET '>H

ELEVATION ' 9.9> 9.9H 9.9

SCAN 1. 380 2. 380 3. 380 4. 380 5. 380 6. 380 7. 380 8. 380 9. 380 10. 380 11. 380 12. 380 13. 380

\$SKED←スケジュール情報

1741-038	60	SX	PREOB	84055180000	380	MIDOB	0	POSTOB	'->-H-	1F0000	1F0000	1F0000
3C345	60	SX	PREOB	84055180940	380	MIDOB	0	POSTOB	'->WH-	1F4275	1F4275	1F4275
1741-038	60	SX	PREOB	84055181920	380	MIDOB	0	POSTOB	'->WH-	2R8550	2R8550	2R8550
0212+735	60	SX	PREOB	84055183300	380	MIDOB	0	POSTOB	'->-H-	2R4275	2R4275	2R4275
3C345	60	SX	PREOB	84055184740	380	MIDOB	0	POSTOB	'->CH-	1F0000	1F0000	1F0000

\$SOURCES←電波星情報

0106+013	4C01.02	01	08	38.7710037	+01	35	00.323000	2000.0	0.00
0212+735	\$	02	17	30.8129997	+73	49	32.623001	2000.0	0.00
0528+134	OG147	05	30	56.4160003	+13	31	55.148002	2000.0	0.00
0522+393	DA193	05	55	30.8050003	+39	48	49.165000	2000.0	0.00
0851+202	OJ287	08	54	48.8740005	+20	06	30.638999	2000.0	0.00
0923+392	4C39.25	09	27	03.0130000	+39	02	20.849998	2000.0	0.00
1226+023	3C273B	12	29	06.6990003	+02	03	08.594999	2000.0	0.00
1404+286	OQ208	14	07	00.3939999	+28	27	14.687999	2000.0	0.00
1641+399	3C345	16	42	58.8089981	+39	48	36.995002	2000.0	0.00
1741-038	\$	17	43	58.8550033	-03	50	04.609999	2000.0	0.00
2134+004	OX057	21	36	38.5859985	+00	41	54.219001	2000.0	0.00
2200+420	VR422201	22	02	43.2900009	+42	16	39.983001	2000.0	0.00
2251+158	3C454.3	22	53	57.7470016	+16	08	53.565002	2000.0	0.00

\$STATIONS←観測局情報

A	'	MOJAVE	12	XY	30	0.0000	60.0	-90.0	90.0	60.0	-90.0	90.0	12.0	MO	MO
A	>	KASHIMA	4	AZEL	0.0000	60.0	5.0	715.0	60.0	10.0	90.0	26.0	KA	--	
A	H	HATCREEK		HADC	0.0000	20.0	-87.0	87.0	20.0	10.0	89.7	26.0	HC	03	
P		MO	MOJAVE	12		-2356169.15		-4646756.83							3668471.22
P		KA	KASHIMA			-3997890.34		3276580.33							3724119.14
P		HC	HATCREEK			-2523968.05		-4123507.27							4147753.18
T		03	TVDS-1												

\$CODES←観測周波数情報

F JUN82-SX SX

C	SX	X	8210.99	10000.0	1	C	2.000	1	(15)	2	(16)
C	SX	X	8220.99	10000.0	2	C	2.000	1	(1)	2	(2)
C	SX	X	8250.99	10000.0	3	C	2.000	1	(17)	2	(18)
C	SX	X	8310.99	10000.0	4	C	2.000	1	(3)	2	(4)
C	SX	X	8420.99	10000.0	5	C	2.000	1	(19)	2	(20)
C	SX	X	8500.99	10000.0	6	C	2.000	1	(5)	2	(6)
C	SX	X	8550.99	10000.0	7	C	2.000	1	(21)	2	(22)
C	SX	X	8570.99	10000.0	8	C	2.000	1	(7)	2	(8)
C	SX	S	2217.99	10000.0	9	C	2.000	1	(23)	2	(24)
C	SX	S	2222.99	10000.0	10	C	2.000	1	(9)	2	(10)

第6表 オリジナル・スケジュール作成時のパラメータ群

EXPERIMENT		実験名
CALIBRATION	120 sec	各観測前の校正データ取得時間
SUBNET		サブネットを組む観測局群
DURATION	180 sec	観測時間
IDLE	0 sec	各観測後の予備時間
PREOB	PREOB	観測前プロシージャ名称
MIDOB	MIDOB	観測中プロシージャ名称
POSTOB	POSTOB	観測後プロシージャ名称
FREQUENCY	SX	周波数コード名
MODULAR	60 sec	半自動スケジュール作成時のスタート時刻の刻み設定
LOOKAHEAD	1200 sec	ソースの出没の予測を行う時間範囲
MINIMUM	0 sec	観測開始時刻の間の最小値
CHANGE	420 sec	テープ交換所要時間
LENGTH	6200 feet	記録テープの長さ

第7表 DSTIF 部コマンド表

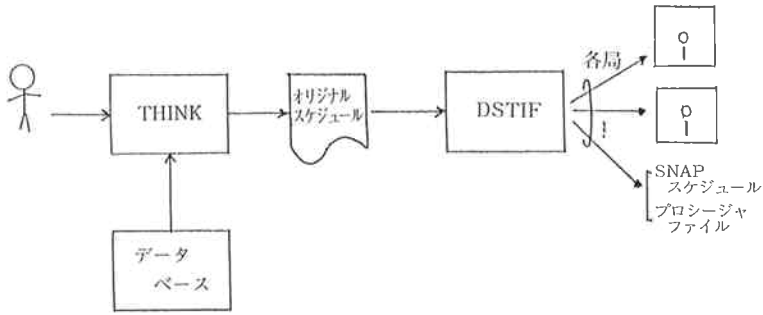
SKEDULE	オリジナル・スケジュール・ファイル名の設定
STATION	観測局の指定
LABEL	記録テープラベル出力 LU 指定
FL	フロッピーディスクの LU 指定
SHOW	スケジュールのサマリをリストする
POINTF	アンテナ・プログラム追尾用ファイルを必要とする局のためのオプション
SNAP	オリジナル・スケジュールから, SNAP スケジュールを作り出す
TAPELABEL	記録テープラベル出力要求
LIST	SNAP スケジュールの出力
PROCEDURE	オリジナル・スケジュールから, SNAP PROCEDURE を作り出す
DIRECTORY	フロッピーにディレクトリを作る
? ?	コマンド一覧と内容を表示
?	コマンドの使用法を表示
EX	KASER を終了
::	KASER を終了
ECHO	プロシージャ使用時の実行状況表示要求
COMMAND	プロシージャ作成モードに入る
LL	表示デバイス変更
!	指定した時間サスペンドする
TR	入力デバイス変更

ため、評価関数をすべての可能解に対し計算するのは極めて困難であり、現実的な手法が望まれている。それは VLBI 実験が米国内の特定観測局間で試験的に行われた時代を終え、世界各地における多局化、また移動局を用いた実験の増加を考えた時、目的とする物理パラメータをよりよく決定するためにも、まだまだ少いとは言えぬ会話型における手間の減少のためにも必要である。

最後に、本ソフトウェア製作に協力頂いた日本電子開発の鈴木保立氏に感謝します。また、NASA/GSFC のスタッフには大変お世話になった、ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) N. R. Vandenberg, "MarkIII Software Documentation", 1983. Dec. 1.
- (2) 刀根薫; "数理計画" (理工系基礎の数学 11), 朝倉書店, 1978.
- (3) 茨木俊秀; "数理計画法の展開をさぐる-VII (組合せ最適化とラグランジュ緩和)", システムと制御, Vol. 25, No. 4, pp. 222-230, 1981.
- (4) 茨木俊秀; "数理計画法の展開をさぐる-VI (計算の複雑さの理論と数理計画法)", システムと制御, Vol. 25, No. 2, pp. 91-100, 1981.
- (5) Chopo Ma; "Very Long Baseline Interferometry Applied to Polar Motion, Relativity and Geodesy", NASA Technical Memorandum 79582, May 1978.
- (6) 吉野, 河野, 高橋; "VLBI における局内遅延測定



第11図 KASER の流れ

の諸問題”，昭和53年度経緯度研究会・衛星測地研究会集録.

- (7) 中嶋浩一；“最適観測スケジュールと電波源分布”，位置天文学における新技術研究会集録，1983，1月.
- (8) 川瀬成一郎；“VLBIによる天文・測地パラメータ推定の可観測性評価”，電波研季報，26，137，pp.479-484，1980.
- (9) 若生康二郎編；“地球回転（現代天文学講座1）”，

恒星社，1979.

- (10) 藤下，井上；“VLBIシミュレーション用の電波源リスト”，「宇宙技術を利用した地球回転運動の研究」に関するシンポジウム集録，1984年2月.
- (11) N. R. Vandenberg, “MarkIII Field System Documentation”, 1981. Oct. 1.
- (12) “K-3型VLBIシステムデータ収集・制御ソフトウェア取扱説明書(KAOS Ver 2.0)”，昭和58年10月.

