

## 60cm電波望遠鏡の音響光学型電波分光計の開発

海田 正大\*・土橋 一仁\*・西浦 慎悟\*・小川 英夫\*\*・米倉 覚則\*\*  
中島 拓\*\*・半田 利弘\*\*\*・河野 孝太郎\*\*\*・森野 潤一\*\*\*\*

地学科\*

(2006年5月26日受理)

KAIDEN, M., DOBASHI, K., NISHIURA, S., OGAWA, H., YONEKURA, Y., NAKAJIMA, T., HANDA, T., KOHNO, K. and MORINO, J. -I.: Development of acousto-optical spectrometers for 60cm radio telescope. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Natur. Sci., 58: 131 – 149 (2006) ISSN 1880-4330

### Abstract

We report on the performance of two new Acousto-Optical spectrometers (AOSs) that we developed for the 60cm radio telescope equipped with a new sideband-separating (2SB) receiver system which enables us to detect two different radio frequencies simultaneously. Each AOS has a bandwidth of 250 MHz and a frequency resolution of 240-280 kHz depending on the frequency within the band. An old AOS used for the telescope was rather unstable, because it used to be installed in a small receiver-cabin where an accurate control of the ambient temperature affecting the stability of the spectrometer was difficult due to the limited room space. We set up the new AOSs in a larger operation room where better control of the ambient temperature can be available. As a result, the AOSs have become stable over >70 seconds, longer than the time scale of a typical drift of the atmospheric emission (0.5-1 minute).

In 2005 March, we successfully made simultaneous observations in  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$  and  $^{13}\text{CO}(J=2-1)$  emission lines toward Orion KL for the first time using the new system, i.e., the 2SB receiver and the two AOSs. After some improvements, we further made mapping observations of several objects in 2005 October, and found that the whole system including the AOSs is stable enough to carry out regular observations.

**Key words** : millimeter-wave radio telescope, acousto-optical spectrometer, radio astronomy

*Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukui-kita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan*

---

\* 東京学芸大学 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)  
\*\* 大阪府立大学 (599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1)  
\*\*\* 東京大学天文学教育研究センター (181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1)  
\*\*\*\* 国立天文台光赤外研究部 (181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1)

## 1. はじめに

現代の天文学において、ミリ波帯での分子分光観測は、極めて重要な研究手段である。コロムビア大学の1.2m電波望遠鏡(例えば, Dame et al., 1987, Dame et al., 2001)や名古屋大学の4 m電波望遠鏡を用いて行われたサーベイ観測(例えば, Dobashi et al., 1994)によって、銀河系内の分子雲の大局的な分布が描き出され、星間物理学の研究に大きなインパクトを与えた。

東京学芸大学天文学研究室では、大阪府立大学宇宙物理学研究室及び東京大学天文学教育研究センターとの協力の下、60cm電波望遠鏡(VST-1)のリニューアルに取り組んでいる。60cm電波望遠鏡の写真を図1に示す。60cm望遠鏡は、200GHz帯でのサーベイ観測に利用することを目的とした望遠鏡で、1988年から1989年にかけて国立天文台野辺山宇宙電波観測所の構内に建設され(Hayashi et al., 1990)、銀河中心及び巨大分子雲の観測に活躍した(例えば Sakamoto et al., 1995, Oka et al., 1998)。

VSTリニューアルの目的は、60cm電波望遠鏡に、大阪府立大学で開発された200GHz帯で2周波同時受信可能な2 Side Band(2 SB)受信機を搭載し、暗黒星雲及び巨大分子雲のマルチライン観測を行うことである。主な開発項目は、光学系の開発、2周波(上下両サイドバンド)同時受信可能な導波管型サイドバンド分離ミキサ(sideband separating mixer, 以下2 SBミキサ)を用いた受信機の開発、2系統の中間周波増幅系の製作、音響光学型分光計(AOS)の開発、温度較正用チョッパーの製作及び制御システムの改良である。東京学芸大学ではAOSの開発及び温度較正用チョッパーの製作を進めてきた。本論文ではAOSの開発について報告する。

AOS開発における重要なポイントは次の3点である。第1点は、帯域幅250MHzのAOSを1台から2台に増設すること、第2点はAOSを従来設置されていた受信機室から温度環境の良い観測室へ移設すること、第3点は、2 SB受信機からのLSB及びUSB両サイドバンドの信号を同時取得するためのソフトウェアを合わせて開発することである。1点目については、装置の互換性を重視し、1系統を増設するのではなく、あらたに2系統の帯域幅250MHzのAOSの設計・製作を行った。また、その性能を評価した。2点目については、新たに観測室内に暗室を設け、光学定盤上に2系統のAOSを設置した。3点目については、Linux-PCを積分器に用いた2系統同時データ取得システムを開発した。

2005年3月に新システムでの試験観測を行い、 $^{12}\text{CO}$



図1 60cm電波望遠鏡(VST)。

( $J=2-1$ )(230.538GHz)及び $^{13}\text{CO}$ ( $J=2-1$ )(230.398GHz)の2周波数同時観測に成功した。その後は本格観測の開始に向けて、各装置の調整等及び光学及び電波での指向性の評価を進めた。2005年の10月には新システムによる初のマッピング観測にも成功した。現在は定常観測が進められている。

## 2. 電波望遠鏡の構成

ミリ波分子分光観測には、観測装置として電波望遠鏡が用いられる。電波望遠鏡の基本的な構成を、図2に示す。電波望遠鏡は大別してアンテナ、受信機、計算機で構成される(例えば赤羽他, 1988)。受信機のうち、ミキサ、前段の増幅器といった装置をまとめてフロントエンドと呼ぶ。また、後段の増幅系、分光器、積分器といった装置をまとめてバックエンドと呼ぶ。また目標の天体の追尾、取得したデータの解析等を行う計算機部を制御系と呼ぶ。

アンテナで集光された受信信号は、光学系(ビーム伝送系)を用いてミキサへと導かれる。ミキサでは、受信信号と局部発振器からの信号を混合し、その差分の周波数の信号、すなわち「うなり」の信号を中間周波数信号(IF信号)として出力する。適切な電波強度までIF信号を増幅したあと、分光計に入力して周波数分離する。この受信方式をヘテロダイン受信方式という。分光観測の場合には周波数毎に細かく分割された、分光データを得る。

分光データは計算機部へと送られて、積分、較正等のデータ処理が行われる。また計算機部ではデータ処理だけではなく、アンテナ駆動制御、温度較正用チョッパーの制御及び局部発振器周波数トラッキング等の受信機の制御も行われている。

### 3 . AOSの原理

#### 3 . 1 AODの回折原理

音響光学型分光計 (Acousto-Optical Spectrometer : 以下AOS)は,音響光学型素子 (Acousto-Optical Deflector : 以下AOD)のBragg回折現象を利用した分光計である (例えばKaifu et al. 1977, Takano et al., 1983)。IF信号は圧電素子 (トランスデューサー)によって同じ周波数の超音波に変換され, AOD (ガラス・水晶その他)に

伝えられる。超音波は媒質中を粗密のパターンを作りながら進行し, 反対側に取り付けられた音波吸収体 (鉛など)によって吸収される。超音波は, 天体からの電波の周波数情報が物質の疎密波に移しかえられたものと考えてよい。AODに単色の平行ビーム (例えばレーザー光など)を入射すると, 超音波の粗密パターンが回折格子の役割を果たし, レーザー光はBraggの回折条件に従い回折する。AODの回折原理を図3に示す。

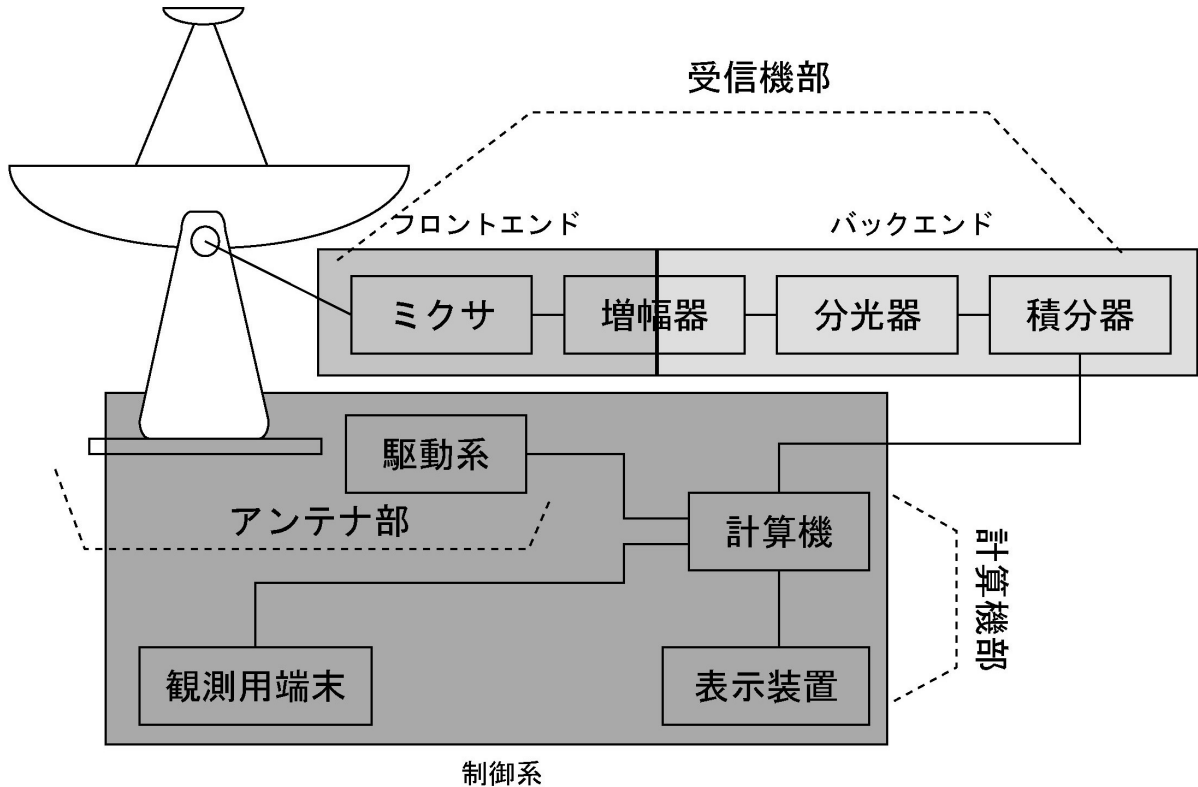


図2 一般的なミリ波電波望遠鏡の構成。

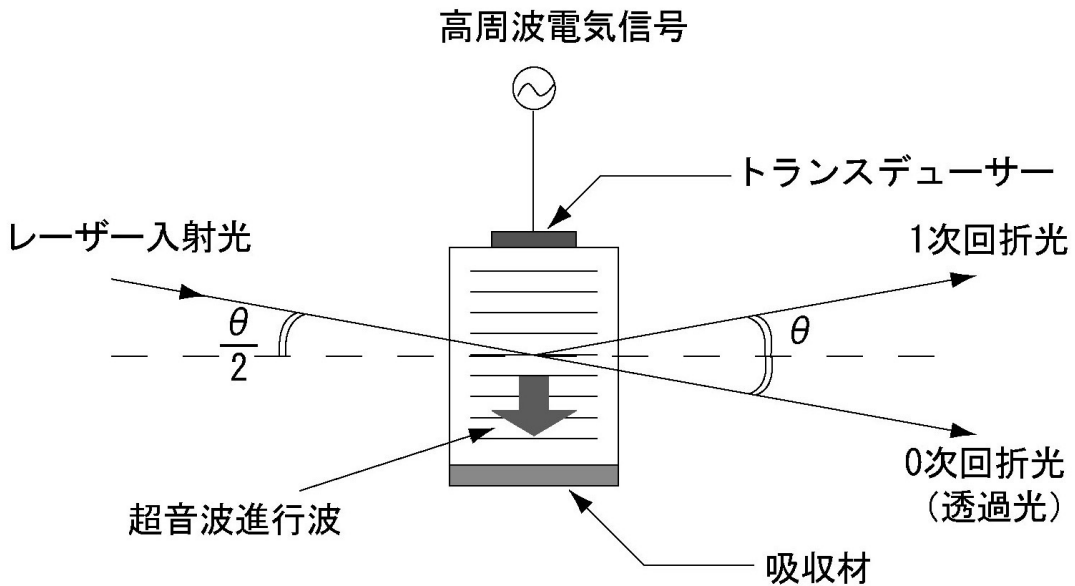


図3 音響光学素子 (AOD) の原理。

ここで、結晶の長さを  $L$ 、レーザーの波長を  $\lambda$  とする。周波数  $f_0$  の入力電波が AOD に入力されるとき、結晶中の超音波の伝播速度を  $v$  とすると、媒質中を伝わる超音波の波長、すなわち回折格子の間隔  $d$  は  $d = v/f_0$  となる。回折光の生じる角度は、0 次光（透過光）と回折光のなす角を  $\theta$  とすると、

$$2d \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = n\lambda \quad \dots\dots (式1)$$

で与えられる。ここで  $n$  は整数である。1 次 ( $n=1$ ) の回折光で、 $\theta$  が小さいとすると、

$$\theta = \lambda/d = f_0 \frac{\lambda}{v} \quad \dots\dots (式2)$$

となる。また、超音波と回折光強度の関係は、

$$I_1 \propto I_0 \sin^2\left(K\sqrt{\frac{P}{\lambda}}\right) \quad \dots\dots (式3)$$

( $I_1$ : 回折光強度,  $I_0$ : 入射光強度,  $K$ : AOD による定数,  $P$ : 超音波の強度,  $\lambda$ : Laser 光の波長)

で与えられる。ここで、入力電圧が小さいとすると式は、

$$I_1 \propto P \quad \dots\dots (式4)$$

となる。これらの式から、入力信号の周波数は回折光の位置（回折角）に、入力信号の強度は回折光の強度に対応することがわかる。この回折光をレンズで集光して、CCD 検出器で回折光の位置・強度を調べることにより、電波の分光を行うことができるのである。

### 3.2 AOSの周波数帯域幅

AOSの周波数帯域幅は、1 次回折光が 2 次回折光と重ならない条件によって決定される。1 次回折光が 2 次回折光と重ならないためには、次の条件が必要である。

$$\theta_{1U} < \theta_{2L} \rightarrow \frac{f_U \lambda}{v} < 2 \frac{f_L \lambda}{v} \quad \dots\dots (式5)$$

( $f_U$ : 帯域の上端の周波数,  $f_L$ : 帯域の下端の周波数,  $f_{center}$ : 中心周波数,  $B$ : 周波数帯域幅 ( $f_U - f_L$ ),  $\theta_{1U}$ : 上端の周波数を入力した時の 1 次光の回折角,  $\theta_{2L}$ : 下端の周波数を入力した時の 2 次光の回折角)

ここで、

$$f_L = f_{center} - \frac{B}{2}, f_U = f_{center} + \frac{B}{2} \quad \dots\dots (式6)$$

であるから、 $B$  と  $f_{center}$  の関係を求めると、

$$B < \frac{2}{3} f_{center} \quad \dots\dots (式7)$$

となり、 $B$  の上限は中心周波数の 2/3 ということになる。

### 3.3 AODの中心周波数

式7からわかるように、AODの帯域幅  $B$  を広くとるためには、AODの中心周波数  $f_{center}$  を高くすれば良い。しかし、実際の  $f_{center}$  の値は、結晶内部での超音波の減衰により制限される。結晶中の超音波の減衰量  $Q$  は、

$$Q = \Gamma L f_{center}^2 \text{ (dB)} \quad \dots\dots (式8)$$

( $L$ : 結晶の長さ,  $\Gamma$ : 超音波減衰率  $\text{dBcm}^{-1}\text{GHz}^{-2}$ )

で与えられる。本研究では AOD の結晶材料として  $\text{TeO}_2$  [001] を使用しているが、その減衰率は  $15 \text{ dBcm}^{-1}\text{GHz}^{-2}$  である。230GHz 帯で 0.3km/s 程度の速度分解能（周波数分解能で約 250kHz）を達成するためには、AOD の有効開口 18mm（ $\sim$  結晶の長さ）を無駄なく利用しなければならない。圧電素子側から  $L = 18 \text{ mm}$  で超音波の強度が半分（-3dB）になる周波数を中心周波数とすると、上式より、

$$3(\text{dB}) = 15 \times 1.8 \times f_{center}^2 \rightarrow f_{center} = 333 \text{ MHz} \quad \dots\dots (式9)$$

となるので、中心周波数  $f_{center}$  は 330MHz 程度が上限となる。実際の AOD では中心周波数を 375MHz として使用している。これ以上中心周波数を高くしても、超音波の減衰のため AOD の有効開口  $L$  が減少し、周波数分解能が低下する（3.4 章の式 11 参照）。

### 3.4 AODの周波数分解能

AODに単一周波数  $f$  を入力したとき、回折効果により 0 次光に対して 方向に  $d = L$  の広がり（ばやけ）をもった 1 次回折光が生じる（ $L$  = 結晶の長さ）。回折光の位置は、この広がりの範囲内では区別できないので、 $d$  に対する位置の広がり  $d$  と、周波数分解能を対応させることが出来る。すなわち、

$$\frac{df}{f} = \frac{d\theta}{\theta} \rightarrow df = \frac{d\theta}{\theta} f \quad \dots\dots (式10)$$

となる  $d = L$ ,  $\theta = f/v$  を代入すると、式10は

$$df = \frac{v}{L} \quad \dots\dots (式11)$$

となる。この  $df$  が周波数分解能である。また、超音波が結晶を横切る時間（アクセスタイム）を  $\tau$  とすると、

$$df = \frac{1}{\tau} \quad \dots\dots (式12)$$

とも表せる。従って、AOD の分解点数  $N$  は、周波数帯域幅を周波数分解能で割り、

$$N = \frac{B}{df} = \frac{2L f_{center}}{3v} \quad \dots\dots (式13)$$

となる。実質的な分解能を求めるには、これに検出器のチャンネル数も考慮しなければならない。AOS の実質的な分解能  $df_{eff}$  は、検出器のチャンネル数を  $S$  とすると

$$df_{eff} = \sqrt{(df)^2 + (B/S)^2} \quad \dots (式14)$$

となる。

### 3.5 AOSの速度分解能

AOSの観測時における速度分解能  $\nu$  は, 光のドップラシフトから

$$\Delta\nu = \frac{\Delta f}{f} c \quad \dots (式15)$$

( $\nu$ : 速度分解能,  $f$ : 周波数分解能,  $f$ : 観測周波数,  $c$ : 光の速度)

となる。同様に速度帯域幅  $V$  は

$$V = \frac{B}{f} c \quad \dots (式16)$$

( $B$ : 周波数帯域幅)

となる。すなわち, 周波数分解能  $f$  及び周波数帯域幅  $B$  が, 速度分解能  $\nu$  及び速度帯域幅  $V$  に対応する。

## 4. AOSの設計・製作

### 4.1 AOSの設計

本研究で製作した, 帯域250MHzAOSの構成(写真)を図4に示す。レーザー等の光学素子について, 以下に述べる。

#### [レーザー]

光源として, He-Neレーザーを使用した(図4)。レ

ーザーの波長は  $\lambda = 632.8\text{nm}$ , 光出力は  $5\text{ mW}$ , ビーム径は  $0.83\text{mm}$  である。

#### [スペイシャルフィルタ]

レーザー光の波面をそろえるため, スペイシャルフィルタを設置した。スペイシャルフィルタは, フォーカスレンズとピンホールが一体になったもので, レーザービームの高次の回折パターンを除去することができる(空間的フィルタリング)。レーザーを集光してピンホールを通すことにより, 散乱されていないレーザー光のみを通過させ, 散乱光をカットすることができる。この結果, ピンホールを通過したビームは非常に均一性の高い放射分布を有することになる。今回使用したスペイシャルフィルタは, 集光レンズの焦点距離  $4\text{ mm}$ , ピンホールの開口は  $4\text{ }\mu\text{m}$  のものを使用した。レーザー光は, 集光レンズの焦点で直径  $4 \times 10^{-3} \times 632.8 \times 10^{-9} / 0.83 \times 10^{-3} = 3.05 \times 10^{-6}\text{m} = 3.05\text{ }\mu\text{m}$  に絞り込まれる。

#### [コリメートレンズ]

レーザー光はコリメートレンズにより, AODの開口以上の径の平行光に変えられる。本研究では, 焦点距離  $160\text{mm}$ , 直径  $40\text{mm}$  のアコリメートレンズを使用した。これによりレーザー光はビーム径が約  $40\text{mm}$  の平行光に変えられる。このビーム径は AODの開口 ( $3 \times 18\text{mm}^2$ ) より十分大きい。

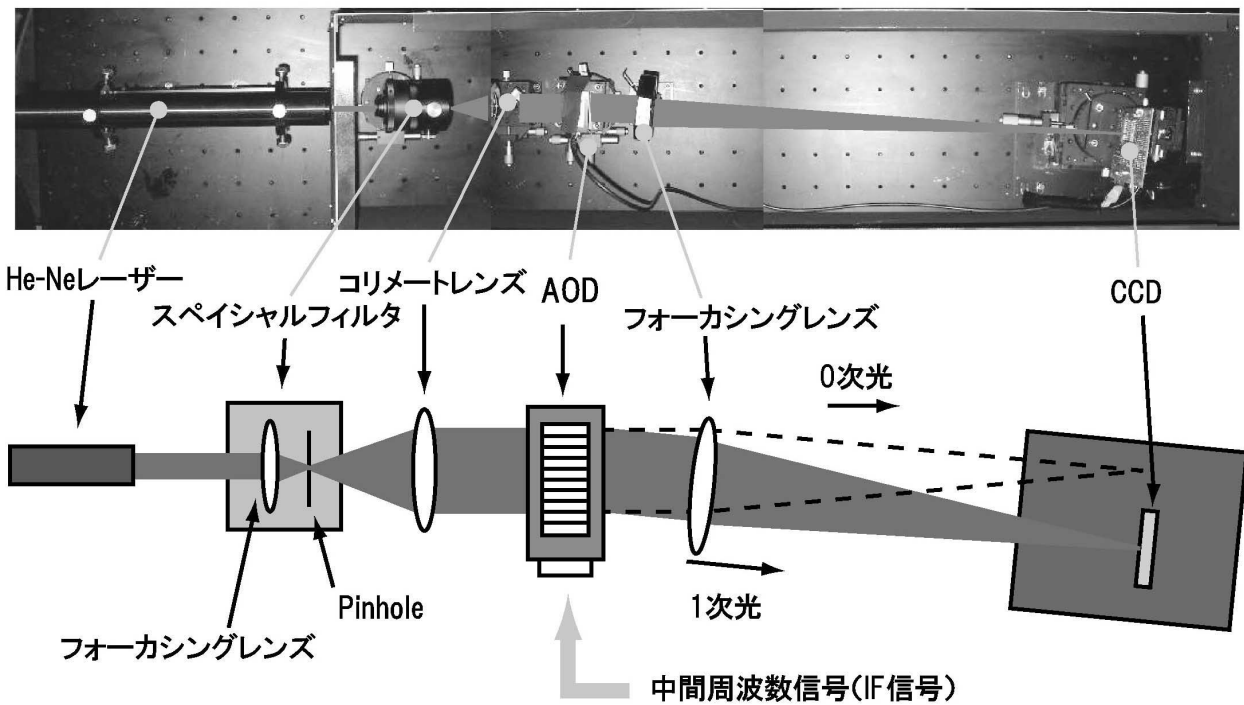


図4 製作した250MHzAOSの写真(上)及びブロック図(下)

表1 本研究で使用したAODの仕様  
Parameters of the acousto-optical deflector

Parameter	AOS No.1	AOS No.2
Name	EFL-D800S1	EFL-D800S1
Central frequency ( $f_0$ ) (MHz)	375	375
Frequency range (MHz)	250-500	250-500
Bandwidth ( $B$ ) (MHz)	250	250
Aperture of crystal ( $D$ ) (mm)	18	18
Deflection angle ( $\theta$ ) (degree)	2.1-4.2	2.1-4.2
Resolved points ( $N$ )	>800	>800
Calculated frequency resolution ( $B/N$ ) (kHz)	<312	<312

[ AOD ]

本研究で使用したAODは松下製EFL-D800S1である。周波数帯域幅は250MHz(周波数250~500MHz)で、中心周波数は375MHz、周波数分解能は312kHzである。回折角は、入射光に対して $2.1^\circ \sim 4.2^\circ$  ( $3.7 \times 10^{-2} \sim 7.4 \times 10^{-2} \text{rad}$ )の方向に生じる。表1に本研究で用いたAODのパラメーターをまとめる。図5にAODの写真を示す。

一次回折光を、フォーカシングレンズを用いてCCD画素上に絞り込む。フォーカシングレンズの焦点距離は、AODの回折角が変化する範囲とCCD画素長の関係で決まる。本機に使用した検出器の画素長は約26mmなので、フォーカシングレンズの焦点距離 $f$ は、 $f \text{ mm} \times 3.7 \times 10^{-2} = 26 \text{ mm}$ より $f = 700 \text{ mm}$ となる。帯域幅を確保するため、250MHzに対応するふれ角がCCD画素長より小さくなる必要がある。本研究において製作し

たAOSは、焦点距離600mmのアクロマートレンズを使用した。

[ CCD ]

沖電気製2048chのCCD(OPA2048CA)を使用した。チャンネル数は、AODの分解点数(800点)の倍以上で、Nyquistのサンプリング定理を満たしている。画素のピッチは $13 \mu\text{m}$ である。回折角は以下の式よりCCD上に

$$\frac{\text{レーザー波長}}{\text{AODの開口}} \times \text{フォーカシングレンズの焦点距離} = \frac{632.8 \text{ nm}}{18 \text{ mm}} \times 600 \text{ mm} \cong 21 \mu\text{m} \quad \dots \text{(式17)}$$

約 $21 \mu\text{m}$ (FWHM)の幅に絞り込まれる。CCD素子は、CCDドライバ上に配置されている。CCDドライバの写真を図6に示す。

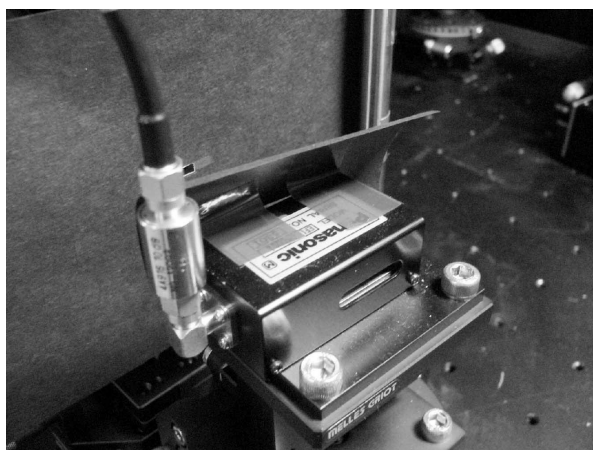


図5 AOD部の拡大写真。

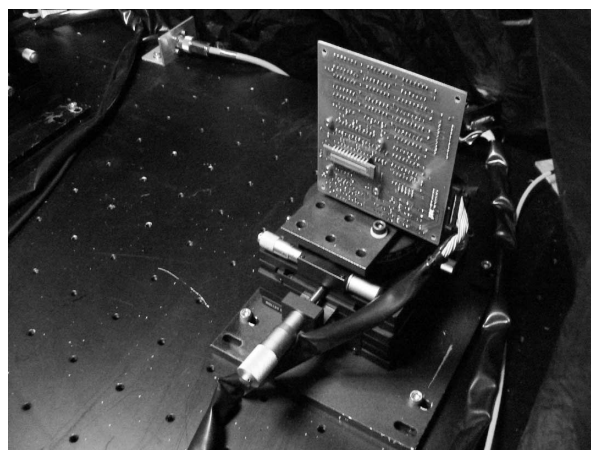


図6 定盤上に設置されたCCDドライバ回路。

[ A/Dコンバーター ]

CCDからのデータは以下の手順でPCに取り込まれる。まずCCDからのアナログ信号をA/D変換し、デジタル信号をバッファメモリ（FIFO）に格納する。その後、バッファの内容をPCに転送する。ここでバッファをはさむのは、A/D変換にかかる時間（1 MHz、2048chで約2 msec）とPCの読み込み時間（現在は約60msec）を合わせるためである。A/D変換には日本通信機社製のA/Dコンバーターを使用している。このA/Dコンバーターには、最大4 chのAOSを接続することができる。またA/Dコンバーターの変換ビット数は12ビットで、変換周波数は1 MHzである。

4.2 観測室への設置

温度環境の良い60cm観測室に光学定盤を設置し、定盤上に2台のAOSを組み立てることとした。光学定盤を観測室に搬入後、シート製の簡易暗室を設置した。その後、暗室の内部に遮光用の内部暗幕を設置した。図7に観測室に設置した簡易暗室と光学定盤の写真を示す。

暗幕設置後、光学定盤上に2系統のAOSを製作した（図8）。また、AOSの隣に設置したラック内に計測機器、PC等を配置した（図9）。

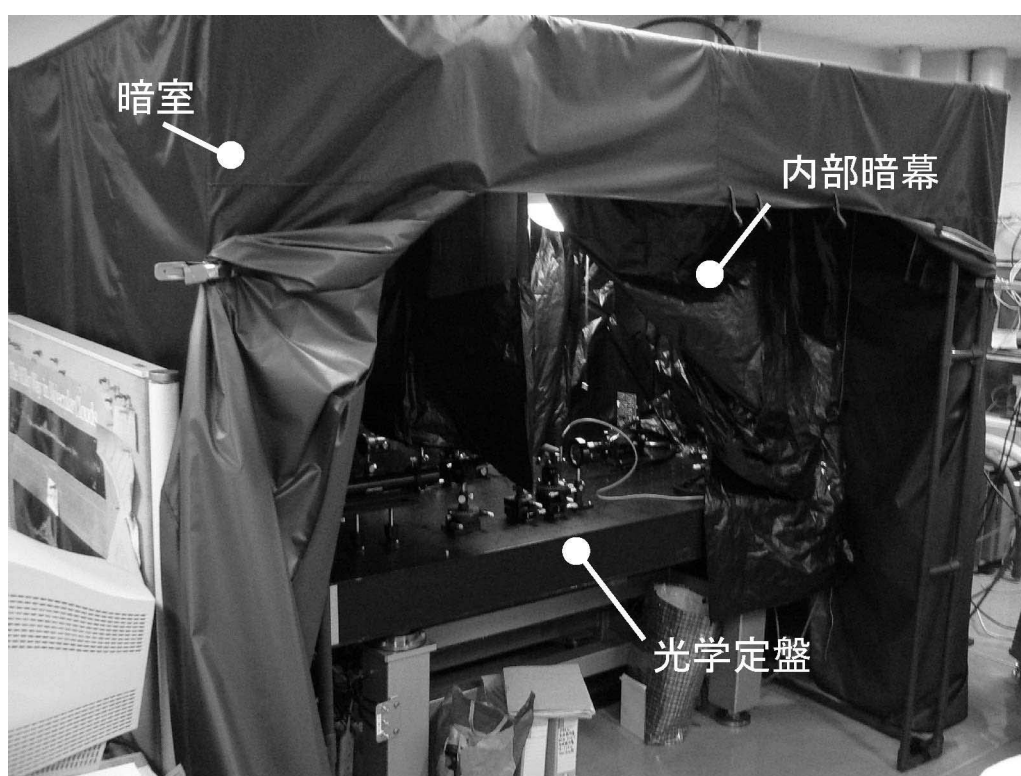


図7 観測室に設置した簡易暗室及び内部暗幕と光学定盤。内部暗幕を開けた時の様子。

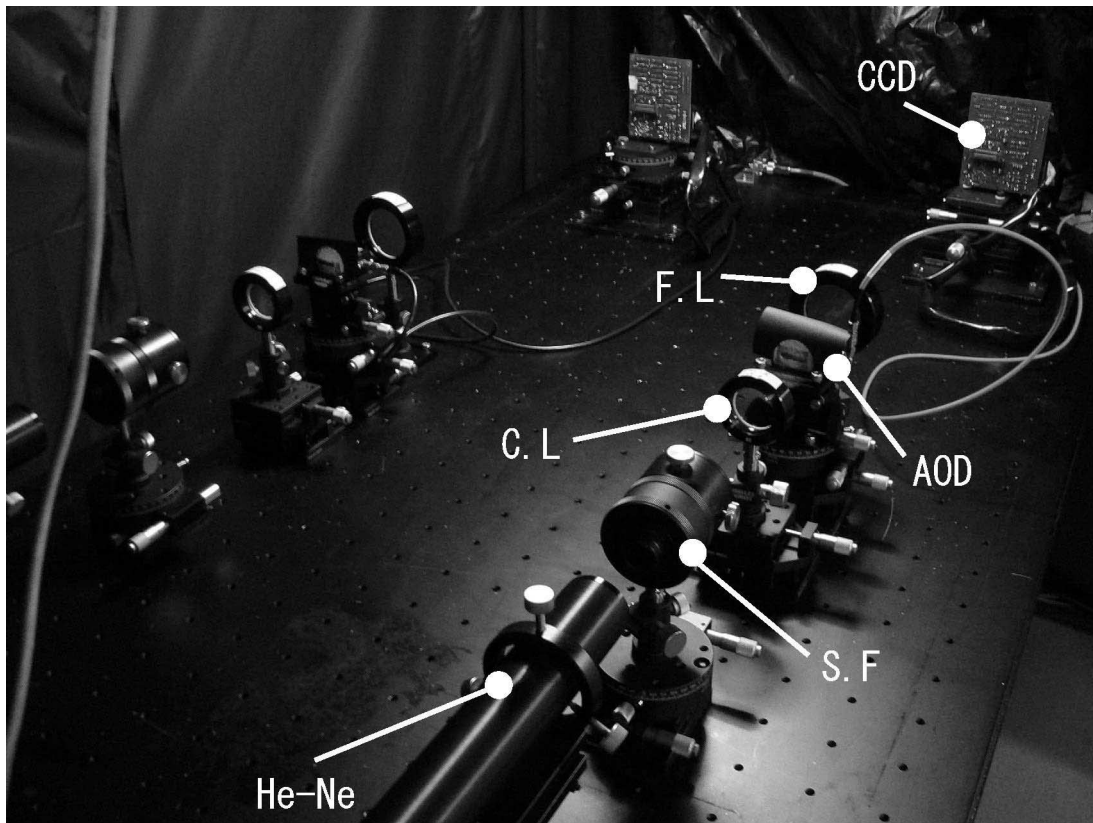


図8 定盤上に設置した2系統のAOS。

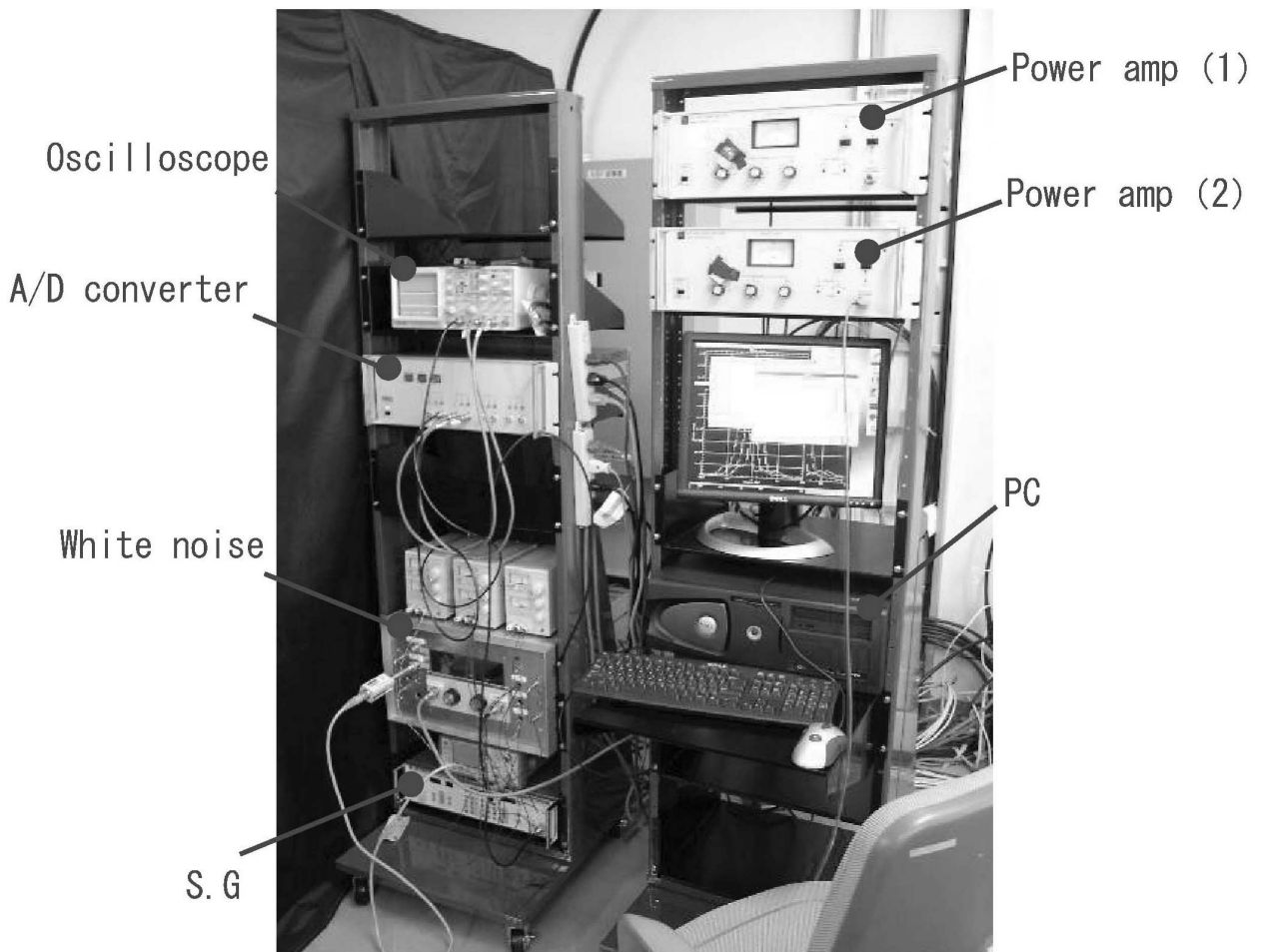


図9 60cm 観測室に設置したAOS用の計測装置。



4.3 データ取得システム・データ通信システムの開発

4.3.1 AOSデータ取得システム

分光計の変更により、新しいデータ取得システムの開発が必要になった。

AOSの受光部であるCCDからの2系統のアナログ出力は、A/Dコンバーターでそれぞれ12bitのデジタルデ

ータに変換され、積分専用PCへ送られる（4.1章AOSの設計・製作参照）。この2系統のデジタルデータを同時に取得するシステムを開発した。このシステムのブロック図を図10に示す。これにより、2SB受信機のUSB及びLSBの両サイドバンド信号の同時取得が可能になった。

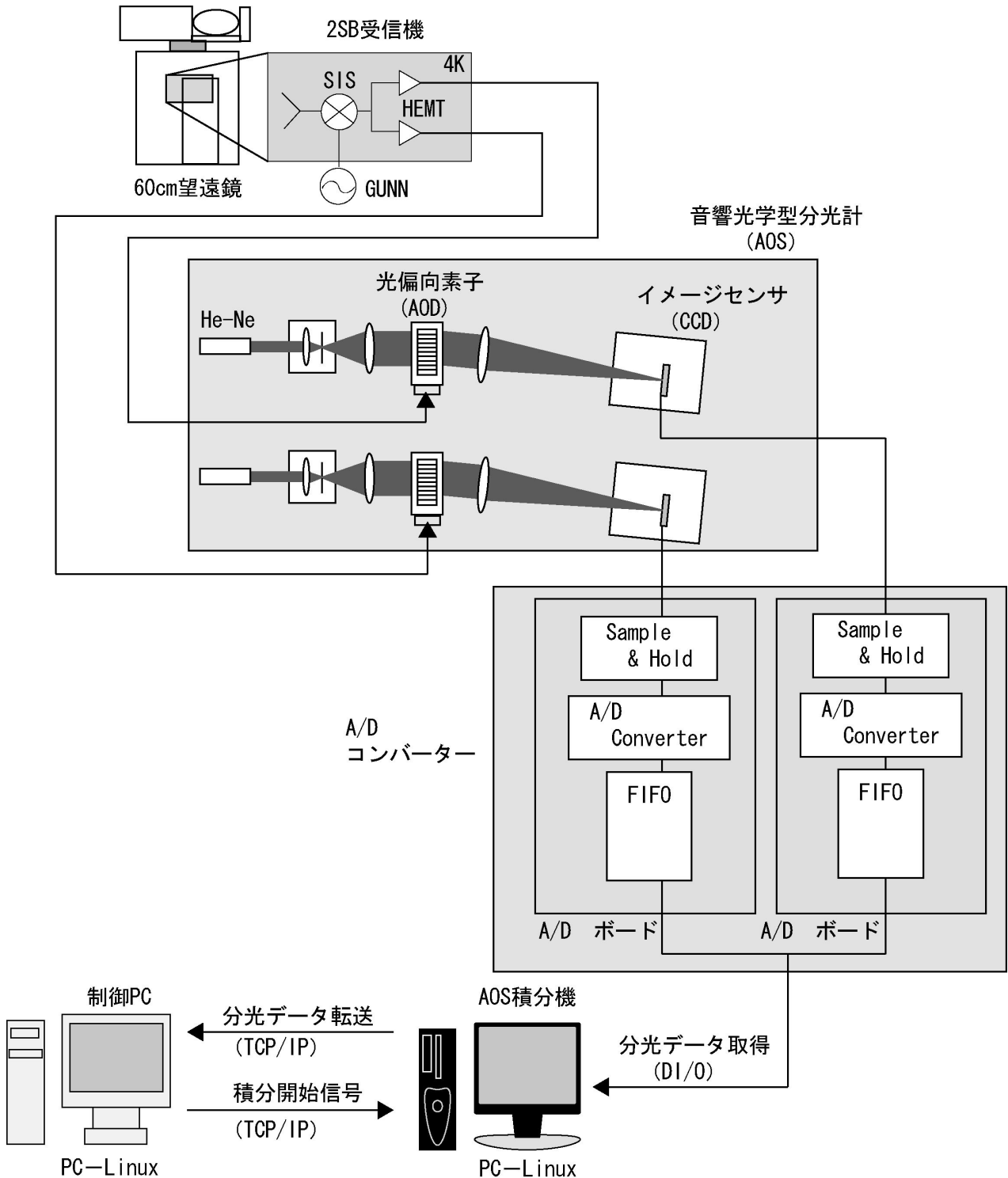


図10 開発した新データ取得システムのブロック図。

デジタルデータの取り込みを行うDI/O(Digital Input/Output)ボードにはInterface社製のPCI-2702を用いた。積分用PCのOSにはVine Linux 2.6.2を採用した。

新たにAOS積分機を設けた事により、AOS積分機と制御PCとの間のデータ通信が必要になった。データ通信にはいくつかの手法がある。通信手法としてNFS、GPIB等が検討されたが、我々は高速で且つハードウェアへの負担が少ない、TCP/IP通信によるプロセス間通信を用いる事とし、AOS積分機-制御PC間のデータ通信システムを開発した。また基準信号発生器として、日通機製のSignal Generator(SG)を使用した。SGの制御はGPIB通信で行った。

#### 4.3.2 AOS性能測定システムの開発

AOSの性能測定システムも合わせて開発した(図11)。主な機能を以下の～に示す。

#### 周波数分解能測定

周波数分解能は、観測周波数をどの程度細かく周波数分割できるかを表すパラメータである。周波数分解能は、AODに入力する電気入力周波数を少しずつらし、回折光が当たるCCDのチャンネルの出力をプロットすることで測定する。このプロットをフィルターカーブといい、フィルターカーブの半値幅がAOSの分解能となる。

周波数分解能の測定には半自動及び自動モードがある。半自動モードでは任意の周波数における周波数分解能を測定することが出来る。また、自動モードでは250, 375, 500MHzでの周波数分解能を測定する。測定する周波数付近( $\pm 1$  MHz)において、SGの発振周波数を20kHzずつずらし、その時のCCDのカウント値を記録する。SGの出力強度は半手動モードでは任意

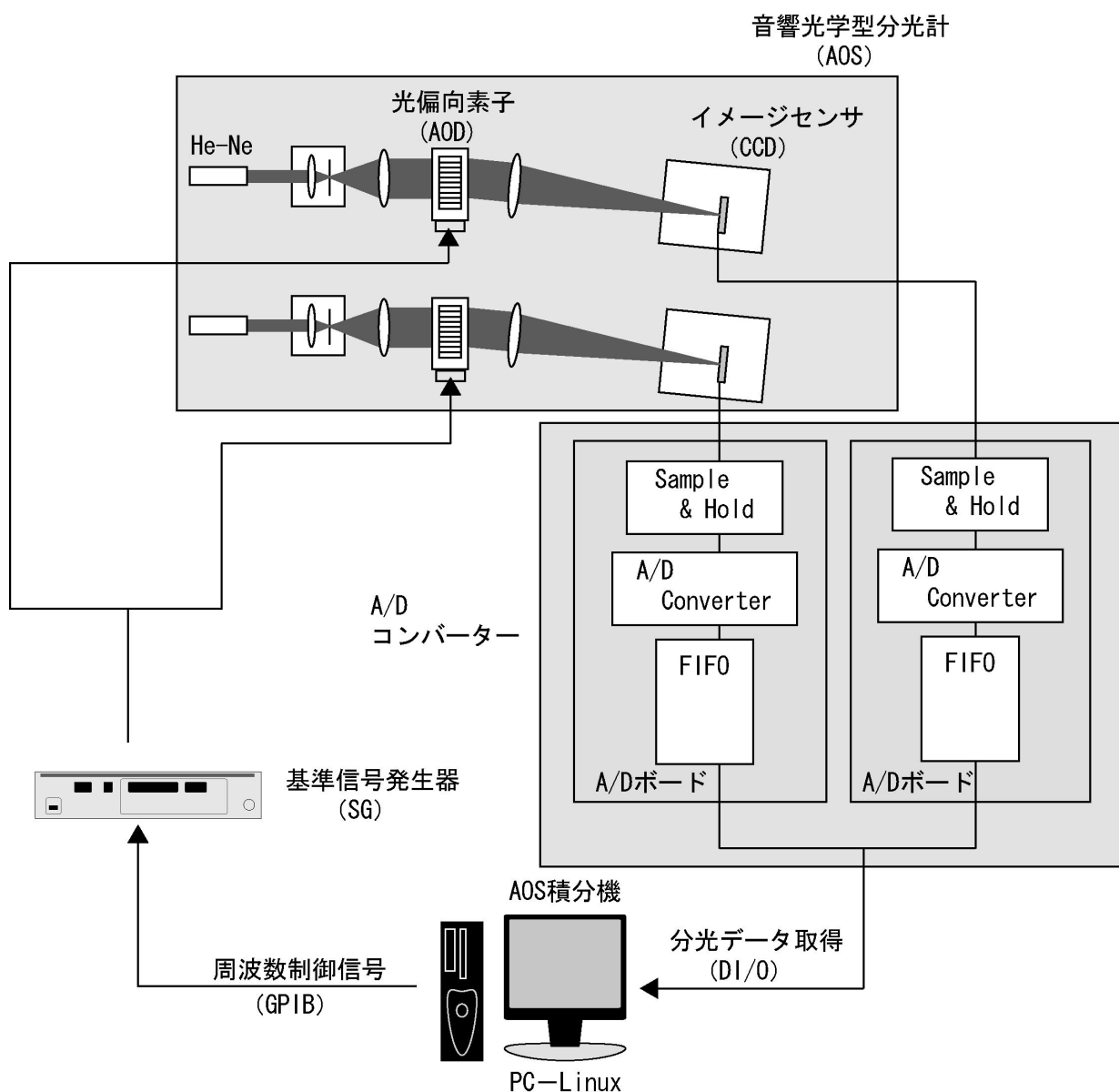


図11 周波数較正用システムのブロック図。

に選択できる。自動モードでは、CCDの最大カウント値(4096)の30~50%の範囲になるように自動的に調整される。

得られた測定結果(フィルターカーブ)に対して、ガウシアンフィットを行い、その半値幅(FWHM)を測定する。測定結果は、Xwindow上に表示され(図12参照)ポストスクリプト及びテキスト形式のデータとして保存される。

周波数較正

周波数較正にも半手動及び自動モードを設けた。自動モードではSGの出力強度の自動調整後測定が行われる。SGは10MHz間隔で出力される。半自動モードでは、任意の周波数間隔、出力強度で測定を行う事ができる。1点毎で得られる出力に対してガウスフィットを行い、その対応チャンネルを求める。この結果を全帯域で行い、1次の直線でフィットすることにより、CCDの全チャンネルに対して対応する周波数を求める。

フィットされた測定結果は、Xwindow上に表示され、ポストスクリプト形式のデータとして保存される。またフィットにより求められた1次式の切片及び傾きはXwindow上に表示され、テキスト形式で保存されるようになっている(図12)。

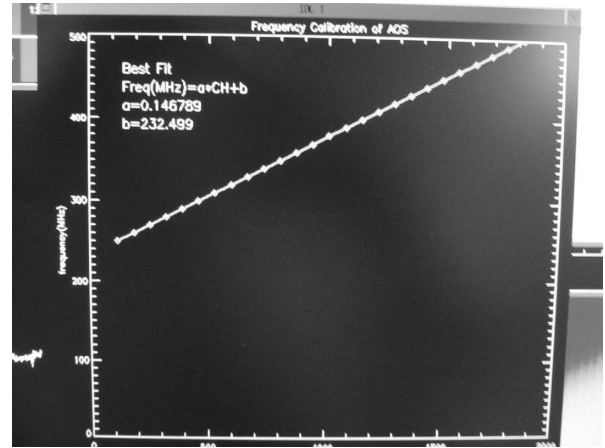


図12 周波数較正の測定結果のグラフ。図中の菱形の印が測定点である。

CCD出力のモニター

機器の制御及び積分データの取得にC言語、画面表示及び測定結果の解析にはIDL(The Interactive Data Language)言語を用い、CCDの出力をリアルタイムでモニターできるようにした。

5. AOSの性能評価

開発したAOSの性能評価を行った。実験は信号源に白色ノイズ源及びSGを用いている。実験回路のブロック図を図13に示す。

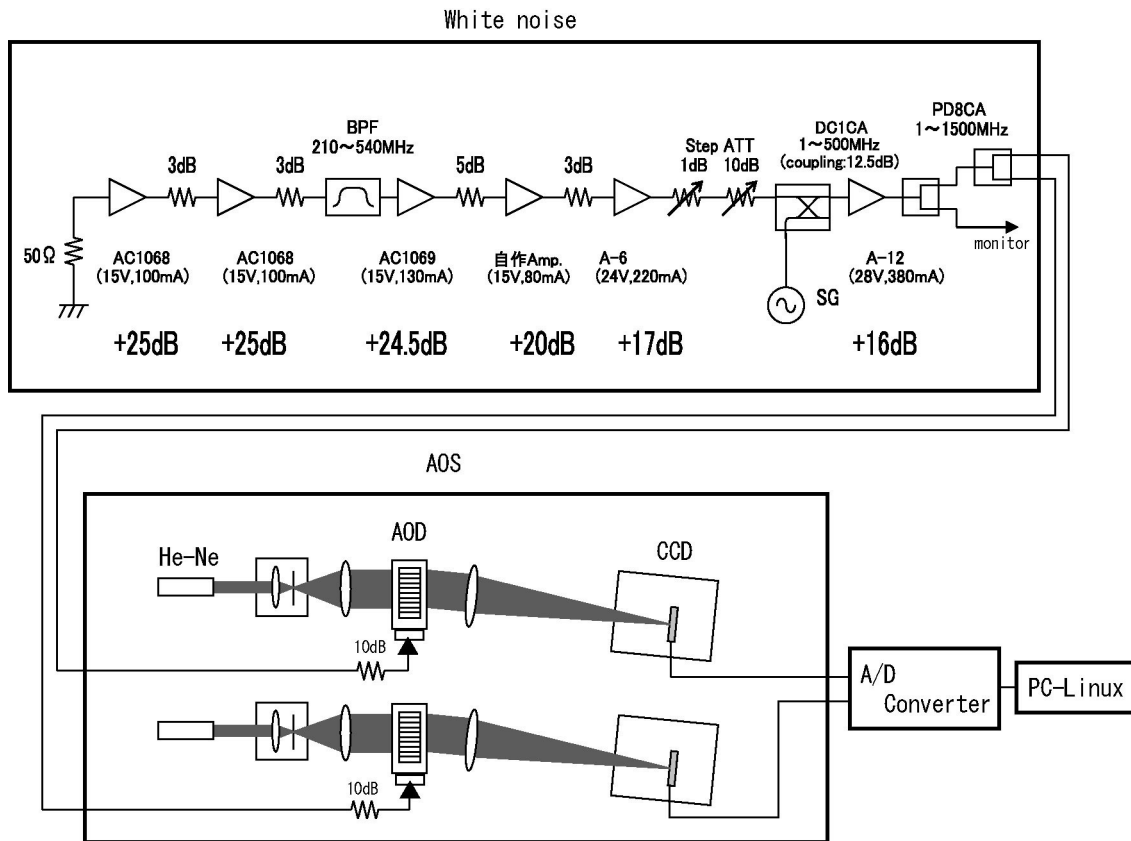


図13 実験回路ブロック図。

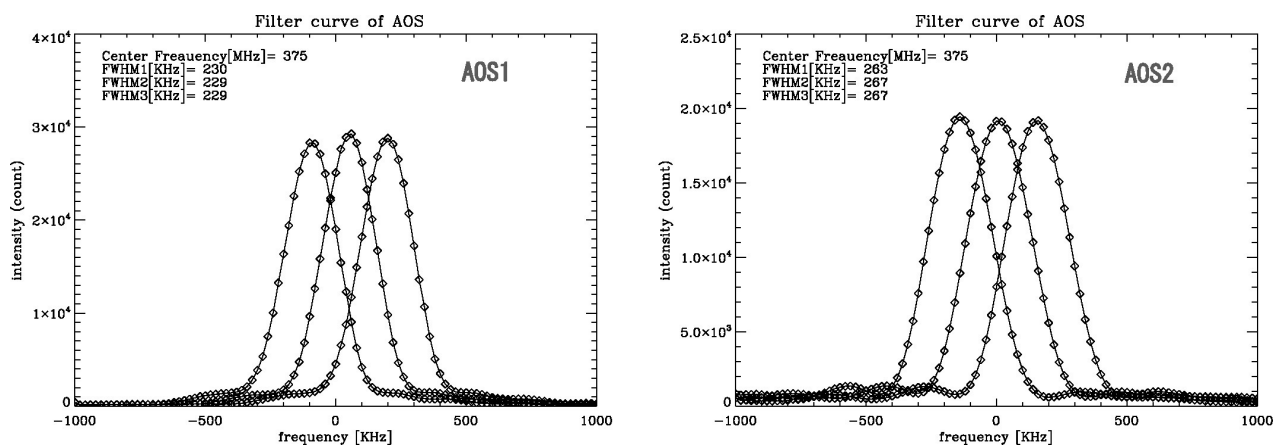


図14 (左) AOS1系統目の中心周波数375MHzでのフィルターカーブ。(右) AOS2系統目の中心周波数375MHzでのフィルターカーブ。

5.1 周波数分解能

図14にAOSの中心周波数375MHzでのフィルターカーブを示す(周波数分解能及び測定方法については4.3.2 参照)。測定周波数間隔は20kHzである。

フィルターカーブの裾の方にこぶのようなものが表れているが、これをサイドローブという、光学系の調整が不完全なときに生じる。サイドローブを軽減するためには、入射光の強度分布をガウシアンにする等の工夫がある。サイドローブがあると、本観測の際に問題となる(例えば本来は存在しない速度成分が存在するという誤った解釈に至る等)ので、サイドローブのレベルは出来る限り下げることが必要である。

5.2 速度分解能

5.1章よりAOSの周波数分解能が全帯域で230~260kHz程度であることがわかった。式15から、開発したAOSの観測周波数230GHzでの速度分解能は

$$\Delta v = \frac{\Delta f}{f} c = \frac{230\text{kHz}}{230\text{GHz}} \times 3 \times 10^8 = 0.3 \text{ km/s}$$

..... (式18)

となる。典型的な分子雲の速度幅は1~2 km/sであるので、これは分子雲の観測にも使える性能である。

同様に速度帯域幅は式(16)から、

$$V = \frac{B}{f} c = \frac{250\text{MHz}}{230\text{GHz}} \times 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$= 330 \text{ km/s}$$

..... (式19)

となる。60cm望遠鏡は、特に分子雲が広い速度範囲に分布している銀河面の観測に用いられる望遠鏡である。北天から観測できる銀河面の速度幅は典型的には100-200km/s程度である。よって、開発したAOSの速度帯域は、銀河面の分子雲を十分にカバーできるものである。

5.3 周波数分解能の帯域内におけるばらつき

AOSの周波数分解能が、カバーしている帯域全体(250MHz~500MHz)に渡って、一様であることを確認するために、AOSの周波数帯域両端での周波数分解能を測定した。図15, 16にAOS 1系統目及び2系統目の帯域両端でのフィルターカーブを示す。

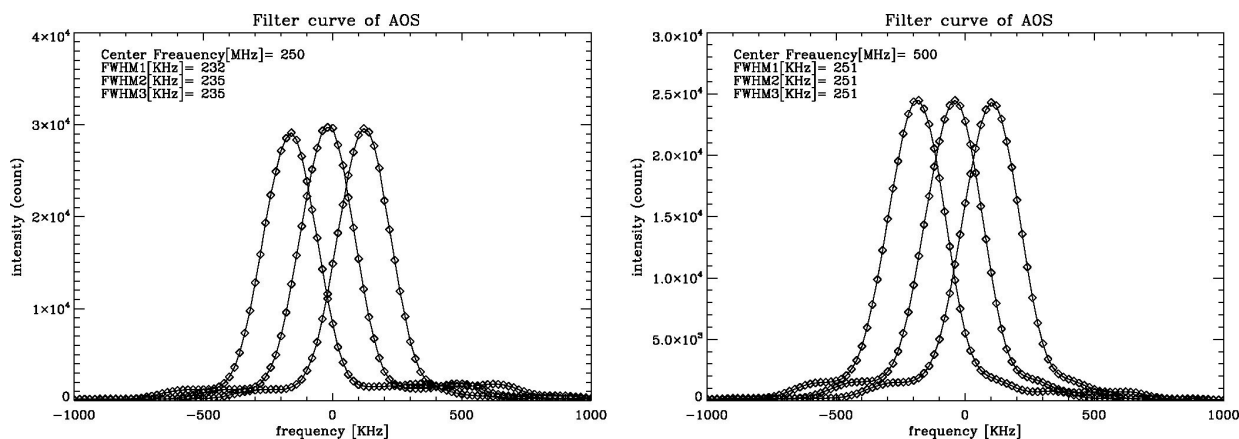


図15 AOS1系統目の帯域両端でのフィルターカーブ。(左) 入力周波数250MHz (右) 入力周波数500MHz。

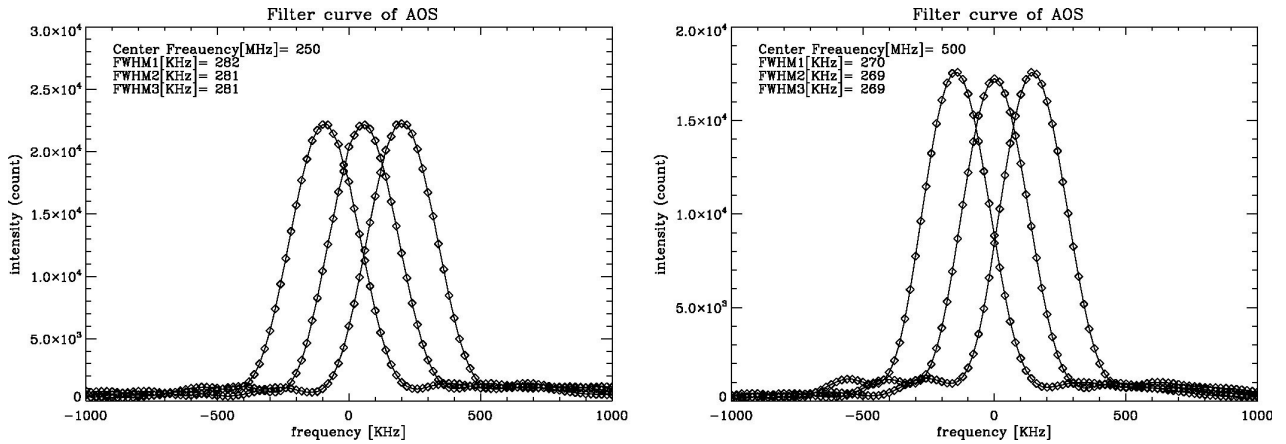


図 16 AOS2系統目の帯域両端でのフィルターカーブ。(左)入力周波数250MHz(右)入力周波数500MHz。

図 15, 16 から, 1 系統目, 2 系統目の AOS 共に, 帯域の両端においても 250kHz 程度の分解能がでていることが分かる。中心周波数である 375MHz に比べ, サイドローブが強く出ているが, メインローブの 1/10 以下であるので観測には十分である。

#### 5.4 周波数応答性及び帯域

AOS の周波数応答性 (バンドキャラクタ) はシステムの安定性, 性能等に大きく影響する重要な要素である。できる限り平坦なバンドキャラクタを得る事が, AOS の高い性能を実現する上で重要になる。図 17 に調整中の AOS-1, AOS-2 のバンドキャラクタを示す。

全チャンネルの CCD のカウント値がピークの半値 (-3dB) 以上であれば, 量子化ノイズの影響を受けること無く A/D 変換を行う事ができる。ここで CCD のカウント値がピークの半値以上の値を取る周波数の範囲を帯域と呼ぶ。図 17 は調整中であるため全周波数範囲において, 半値を確保できている訳ではないが, 調整を行うとほぼ全周波数範囲でピークの半値以上に収まるバンドキャラクタを得る事ができる。すなわち,

AOS の帯域は周波数範囲と同じ 250MHz となる。

#### 5.5 アラン分散・分光アラン分散の測定

##### 5.5.1 システムの安定性

AOS 単体の安定性を評価するために, アラン分散及び分光アラン分散の測定を行った。宇宙電波は微弱なので, 十分な Signal to Noise ratio (以下 SN 比) を達成するためには, 一般に長い積分時間が必要となる。ランダムノイズは積分時間の平方根に反比例して小さくなるが, 実際に得られる観測データには, 地球大気の変動及び, 受信機, IF 系, AOS 等観測装置に起因するドリフト (電波出力の時間変動) が含まれている。ドリフトが卓越する時間スケールで積分しても, データの SN 比は必ずしも向上しない。地球大気からの放射は, 大気の光学的厚さにも左右されるが, 20 秒から 1 分程度のタイムスケールで変動する。従って, 観測装置自身によるドリフトのタイムスケールはそれよりも長い 100 秒程度を達成しなければならない。

##### 5.5.2 アラン分散の測定

アラン分散を用いて評価する「安定性」とは, ラン

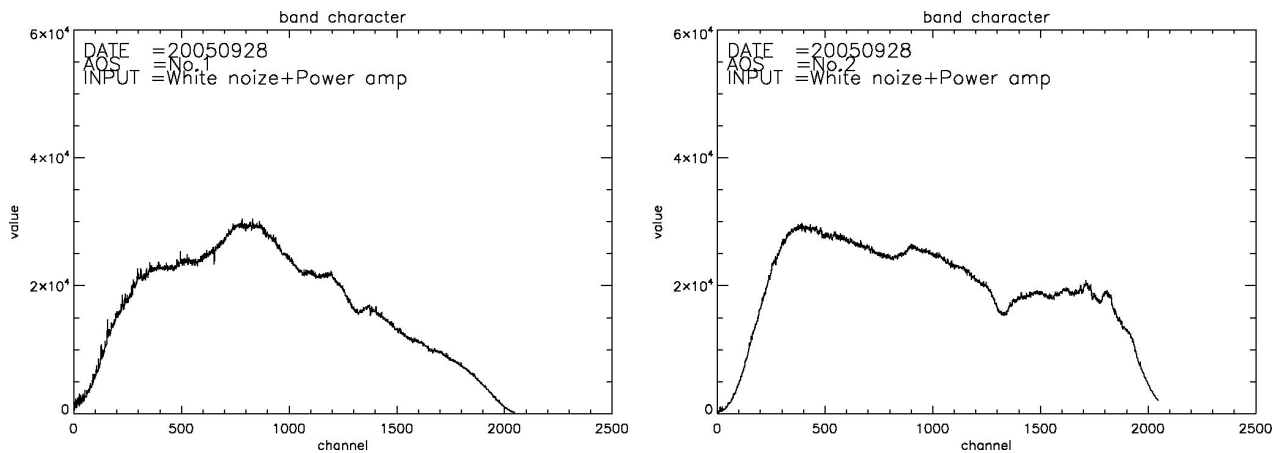


図 17 (左)調整中の AOS-1 のバンドキャラクタ。入力信号は白色ノイズ源である。(右)調整中の AOS-2 のバンドキャラクタ。入力信号は白色ノイズ源である。

ダムノイズに対して系統的なノイズ(ドリフト)がどのくらいの時間で卓越してくるかということである。アラン分散を測定し、AOS1chの出力がどのくらい時間的に安定しているかについて評価する。単位時間ごとに連続してN回サンプリングしたAOSのある1chのデータ列データを取り、i番目のデータを $x_i$ と置く。

$x_i$  ( $i = 1 \sim N$ ) をK個ずつ平均したデータ列 $R_n(K)$ を作る。

$$R_n(K) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_{nK+i}$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, M \quad \dots \dots (式20)$$

$$M = (N/K) - 1$$

次に、 $R_n(K)$  に対して、下記の分散  $\sigma_A^2$  を定義する。

$$\sigma_A^2(K) = \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^M \{R_n(K) - R_{n-1}(K)\}^2$$

$$\dots \dots (式21)$$

これがアラン分散と呼ばれている量である。 $\sigma_A^2$  をKに対してプロットしたものをアランプロットという(e.g., Schieder et al. 1989, Kooi et al. 2000)。アランプロットはデータが時間に対してどの程度安定しているのかを測る良い指標となる。もとのデータ $x$ が白色ノイズのみからなっている場合、 $\sigma_A^2$  は積分時間Kに反比例して単調に減少する。

製作したAOSのアラン分散を、以下の手順で測定した。測定にはAODに入力する信号として白色ノイズ源を用い、白色ノイズ源の信号を、パワーアンプ、アッテネータを通し、AODに入力した(図13)。そして、全2048chの12bit デジタルデータを1秒間積分したデー

タ1000個(合計1000秒分)をPCで読み込み、得られたデータから500chの出力、1000chの出力、1500chの出力のアランプロットを作成した。図18に、製作した2台のAOSのアラン分散を示す。図18からAOS-1では20~30秒で系統的なドリフトが白色ノイズに対して優勢になっていることが分かる。また図18からAOS-2では10秒~20秒で系統的なドリフトが白色ノイズに対して優勢になっていることが分かる。

### 5.5.3 分光アラン分散の測定

電波領域での分子分光観測では、広がりをもつ分子輝線の形や強度を正確に測定するために、一般的には連続成分(ベースライン)は差し引かれる。したがって、あるチャンネルのAOSの出力の時間変動よりも、バンドキャラクタの時間変動の方がデータの質に直接影響する。そこで、各チャンネルの出力の差のアラン分散を測定することでバンドキャラクタの安定性を評価する。単位時間ごとに連続してN回サンプリングしたAOSのある1chのデータ列データと、別のチャンネルのデータ列データを連続して同時に取得する。i番目のデータをそれぞれ $x_i, x'_i$ と置く。

$x_i - x'_i$  ( $i = 1 \sim N$ ) をK個ずつ平均したデータ列 $R_n'(K)$ を作る。

$$R_n'(K) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_{nK+i} - x'_{nK+i})$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, M$$

$$M = (N/K) - 1 \quad \dots \dots (式21)$$

次に、 $R_n'(K)$  に対して、下記の分散  $\sigma_A^2$  を定義する。

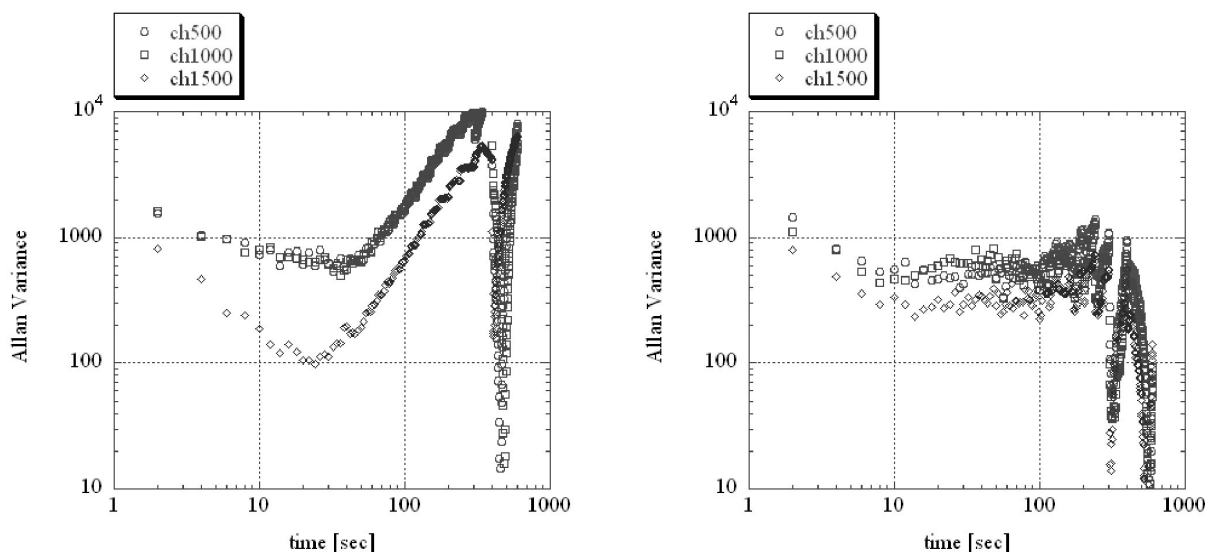


図18 (左) AOS-1のアラン分散(白色ノイズ源入力時)、(右) AOS-2のアラン分散(白色ノイズ源入力時)。図中の丸印は500chのアラン分散の値を示す。同様に四角印は1000ch、菱形のプロットは1500chのアラン分散の値を示す。

$$\sigma_A^2(K) = \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^M \{R_n'(K) - R_{n-1}'(K)\}^2 \quad \dots (式22)$$

これが分光アラン分散である(e.g., Schieder et al. 1989)。分光アラン分散の最小値を与える時間は、バンドキャラクタが安定である最大時間を意味する。分光アランプロットにおいてドリフトが卓越するとベースラインがうねり、分光データから輝線を正確に抽出する事が難しくなる。

測定はアラン分散の測定と同様に行っている。測定データから900ch - 1000ch, 500ch - 1000ch, 300ch - 1700chの分光アランプロットを作成した。作成した分光アランプロットを図19に示す。最大時間(ランダムノイズのみを積分する時間)は図19よりAOS-1で約70秒, AOS-2で約100秒であった。よって, AOS単体に起因するドリフトのタイムスケールは, 地球大気の変動のタイムスケール(経験的に20秒~1分程度)に対して長く確保することができた。

アラン分散及び分光アラン分散の測定結果を比べると, アラン分散の測定結果はAOS-1の方が良く(最大時間が長い), 分光アラン分散の測定結果はAOS-2の方が良い。この結果はアラン分散が主にレーザーの出力の変動の寄与が大きいのに対し, 分光アラン分散は散

乱光の寄与が大きいためであると考えられる(Schieder et al, 1989)。図17のバンドキャラクタからも, AOS-1側の方が散乱光の寄与が多く見られる。よって, AOS-1については散乱光のカット, AOS-2についてはレーザーを交換する事で更なる性能の向上が見込まれる。

### 5.6 AOSの温度環境

AOSは温度変化によって結晶中の進行波の速度が変化するために, その特性が変わる。従って一定の時間毎に周波数較正を行う必要がある。60cm望遠鏡の以前のシステムでは, 温度変化の激しい受信機室にAOSを設置していた事が主な原因で, 20分~30分毎に周波数較正を行う必要があった。本研究ではAOSを受信機室から観測室へ移設し, 温度環境の改善を試みた。

周波数較正の測定結果及び暗室内部の温度を, それぞれ時刻の関数として図20に示す。暗室内部の温度変化は~0.8, 中心周波数に対応するチャンネルの変化は0.2チャンネルであった。これは周波数分解能の1/10程度である事から観測時には問題にならないレベルであると言える。よって, 本システムでは周波数較正は1日に1度程度の頻度で行えば良いという事がわかり, 温度環境を改善する事に成功した。

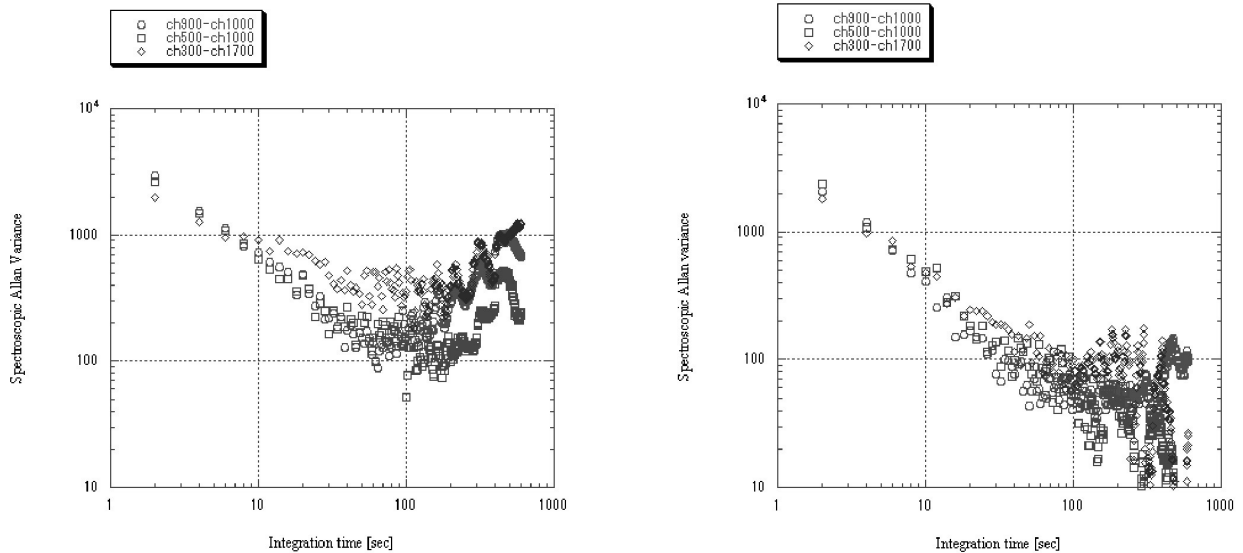


図19 (左) AOS-1の分光アラン分散(白色ノイズ源入力時)。 (右) AOS-2の分光アラン分散(白色ノイズ源入力時)。図中の丸印は900chの出力と1000chの出力の差から算出した分光アラン分散を示す。同様に四角印は500chの出力と1000chの出力の差、菱形印は300chと1700chの出力の差から算出した分光アラン分散を示す。

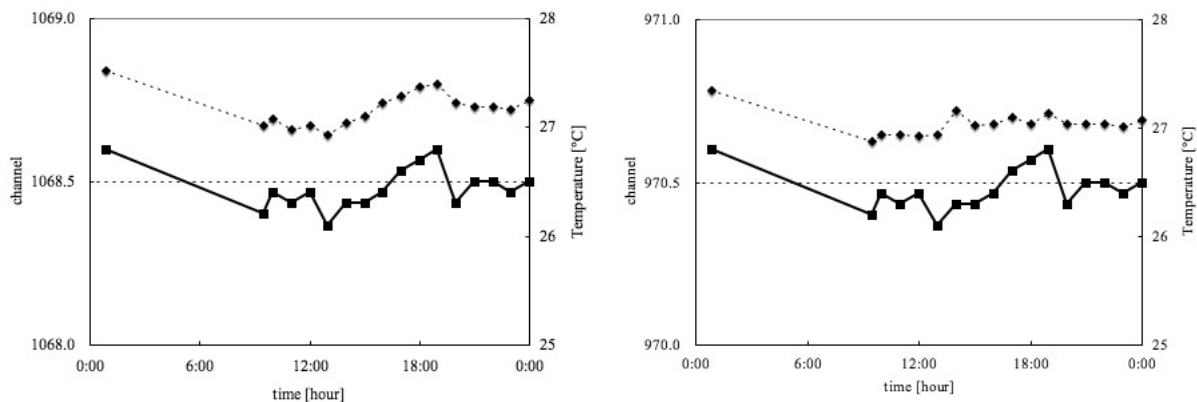


図20 (左) AOS-1の1日の温度変化。図中の実線は暗室内部の温度変化を表し、右の目盛り軸に対応する。図中の破線は中心周波数375MHzの信号入力時に回折光が集光される CCDのチャンネルを表し、左の目盛り軸に対応する。(右) AOS-2の1日の温度変化。

## 6. 60cm 望遠鏡の試験観測とその成果

### 6.1 2005年3月の試験観測とその結果

2005年3月に、新光学系、2SB受信機、2系統のIF系、本研究で開発した2台の音響光学型分光計、及び温度較正用回転チョッパー(海田他, 2005)を60cm望遠鏡に搭載し、Orion KL天体に対する試験観測を行った。60cm望遠鏡をリニューアルする最大の目的は、2SB受信機の特徴を活かした2周波数同時受信システムを実現することである。このため、試験観測では静止周波数230.538GHzの $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 分子輝線及び220.398GHzの $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ 分子輝線の同時受信を目指した。

試験観測は、Orion KL天体に対して行った。当初の目標通り、 $^{12}\text{CO}$ 及び $^{13}\text{CO}$ 分子輝線を同時に検出することができた。積分時間は1分である。得られた分光データ( $T_a$ )を図21に示す(ビーム能率等、望遠鏡のパラメーターをまだ測定していないため、図21に示したアンテナ温度がそのままOrion KL天体の輝度温度にな

る訳ではない)。

図21の中で右のスペクトルのノイズレベルがもう一方に対して、非常に大きくなっている。これはAOSの受光部であるCCDのドライブ回路の故障に原因があることが、その後の実験で分かった。現在この問題は解決されている。

### 6.2 2005年10月の試験観測とその結果

2005年3月のファーストライト後、各装置の調整を進め、2005年の10月には、新システムによる初めての多点観測に成功した。観測天体はOrion KL天体である。総観測点数は49点、1点当りの積分時間は10秒である。観測周波数はUSB側が $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ (230.538GHz)、LSB側が $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ (220.398GHz)である。分光器の周波数分解能はUSB側で240kHz、LSB側で280kHzであった。これは、それぞれ230GHz帯の速度分解能で0.32、0.37km/sに対応する。得られたマップを図22、23に示す。

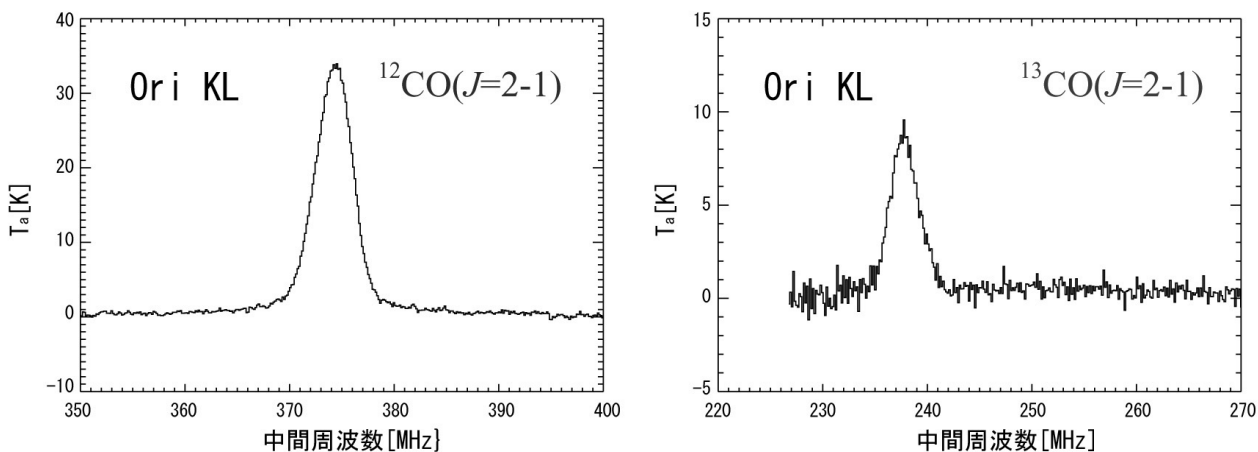


図21 Orion KL天体に対する試験観測で得られた分光データ。左が静止周波数230.538GHzの $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 分子輝線で、右が静止周波数220.398GHzの $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ の分子輝線である。



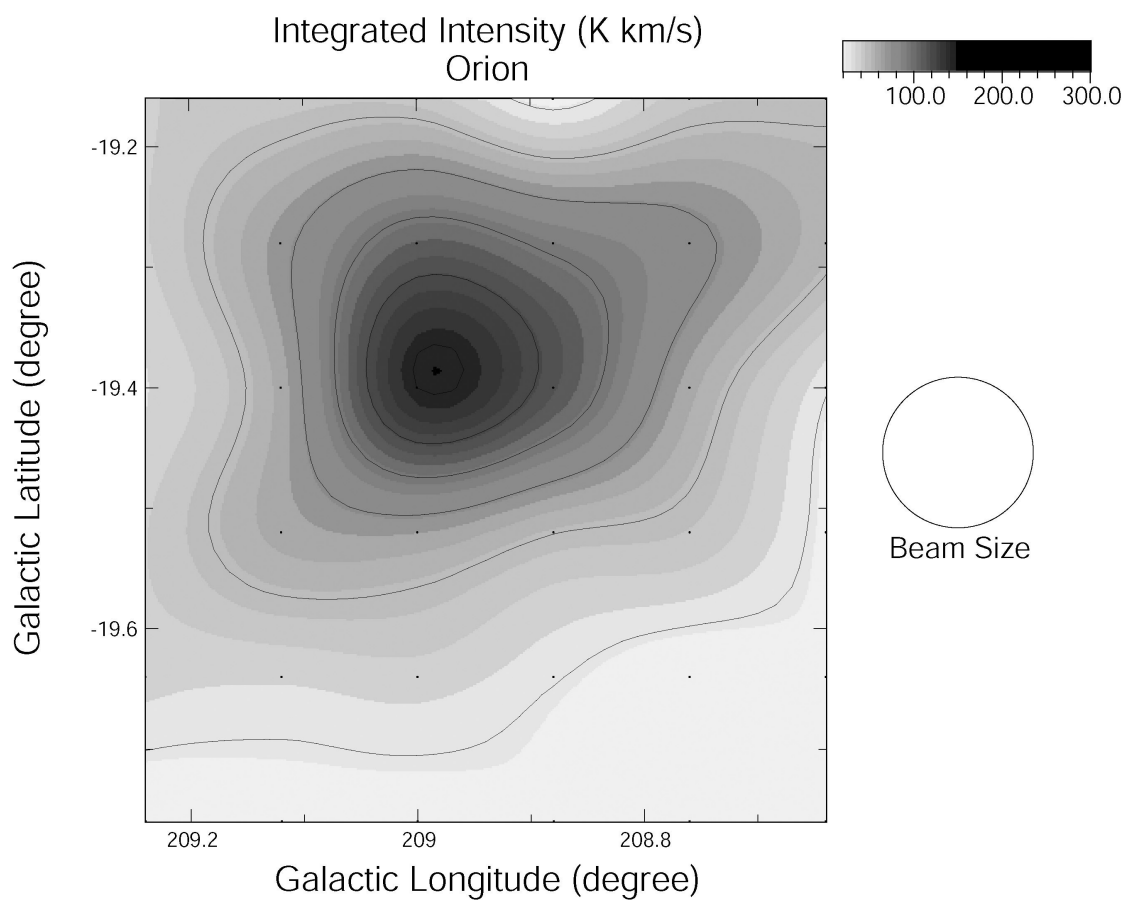


図22  $^{12}\text{CO}$  ( $J=2-1$ ) の積分強度図。観測天体はOrion KL天体である。

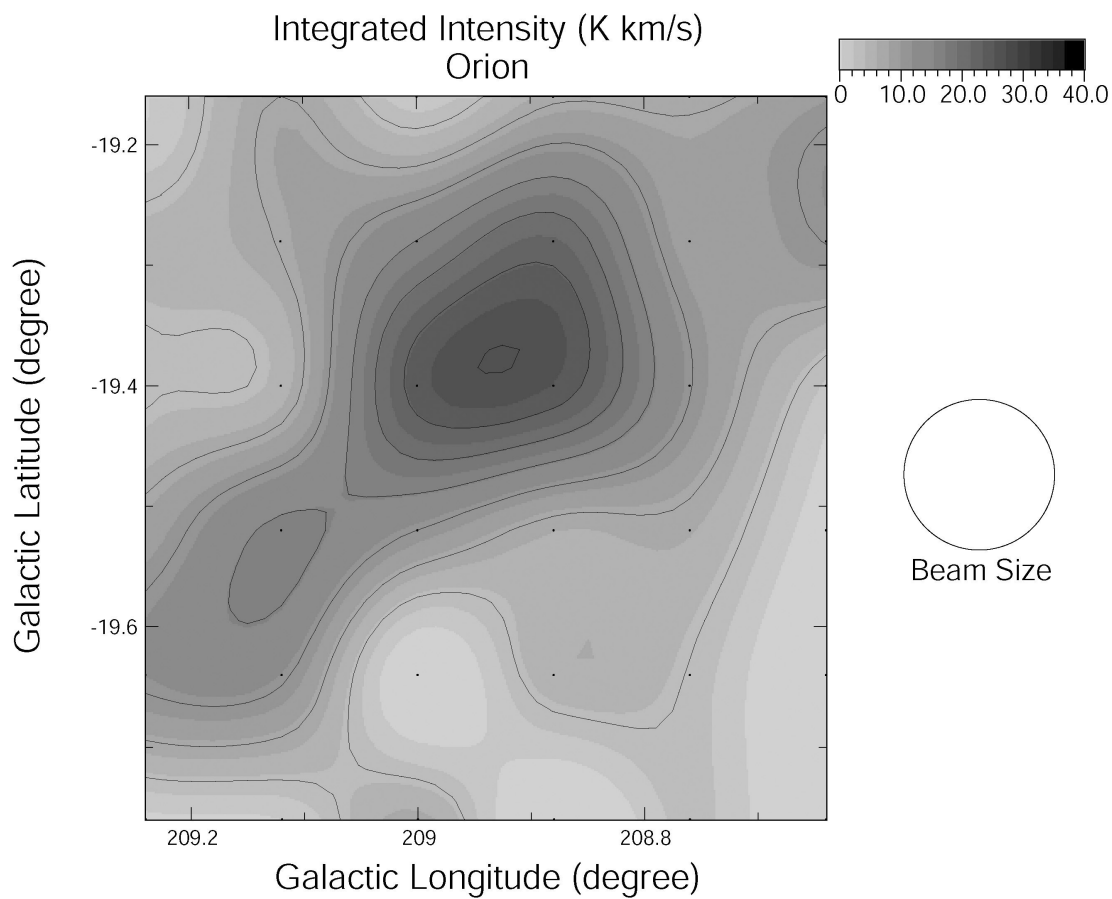


図23  $^{13}\text{CO}$  ( $J=2-1$ ) の積分強度図。観測天体はOrion KL天体である。

表2 開発したAOSの性能(周波数分解能, 周波数帯域幅, サイドローブ)。\*周波数帯域幅は5.4の時点では達成していないが, その後の調整で達成した。

	理論値	測定値
周波数分解能[kHz]	No.1 < 312kHz	No.1 230~250kHz
	No.2 < 312kHz	No.2 270~280kHz
周波数帯域幅[MHz]	No.1 250-500	No.1 250-500*
	No.2 250-500	No.2 250-500*
サイドローブ	No.1 $\leq 13$ dB	No.1 < 10dB
	No.2 $\leq 13$ dB	No.2 < 10dB

表3 開発したAOSの性能(アラン分散, 分光アラン分散の測定結果)

	測定結果(入力: 白色雑音源)
アラン分散	No.1 ~30 秒
	No.2 ~20 秒
分光アラン分散	No.1 ~70 秒
	No.2 ~100 秒

## 7. まとめ

東京学芸大学天文学研究室では, 大阪府立大学宇宙物理学研究室, 及び東京大学天文学教育研究センターとの協力の下, 2 SB受信機の特徴を活かした2周波数同時受信システムの実現を目指し, 60cm電波望遠鏡(VST-1)の2 SB化に取り組んできた。主な開発項目は, 光学系の開発, 2 SBミクサを用いた受信機の開発, 2系統の中間周波増幅系の製作, 音響光学型分光計(AOS)の開発, 温度較正用チョッパーの製作及び制御システム改良である。以下に今回のAOS開発のポイントをまとめる。

(1) 帯域幅250MHzのAOSを1台から2台に増設した。装置の互換性を重視し, 1系統を増設するのではなく, 新たに2系統の帯域幅250MHzのAOSの設計・製作を行った。製作したAOSの性能について表2及び表3にまとめる。

(2) AOSを従来設置されていた受信機室から温度環境の良い観測室へ移設した。観測室内に暗室を設け, 光学定盤上に2系統のAOSを設置した。

(3) 積分器にLinux-PCを用い, 2 SB受信機からのLSB及びUSB両サイドバンドの信号を同時取得するソフトウェアを開発した。

2005年3月に新システムでの試験観測を行い, 試験観測時の目標であった200GHz帯の分子輝線である,  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$  及び  $^{13}\text{CO}(J=2-1)$  の2周波数同時観

測に成功した。これは, 2 SB受信機による2周波数同時観測システムの実現に向けた大きな進展であった。2005年10月には新システムでの初の多点観測に成功した。現在は定常観測が進められている。

## 謝辞

研究を進める上で, 実験の補助やアドバイスを頂きました, 大阪府立大学の東狐義秀さん, 小嶋崇文さんに感謝します。この研究は, 文部科学省科学研究費補助金(特定領域研究, No.15071205及び18026003)及び日本学術振興会科学研究費補助金(No.17540214)による資金的援助を受けました。

## [参考文献]

- [1] 赤羽賢司, 海部宣夫, 田原博人, 1988, 宇宙電波天文学, 共立出版株式会社
- [2] Asayama, S., Ogawa, H., Noguchi, T., Suzuki, K., Andoh, H., Mizuno, A., 2004, Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 25, 107
- [3] Dame, T.M., Ungerechts., Cohen, R. S., de Geus, E. J., Grenier, I. A., May, J., Murphy, D. C., Nyman, L. A., & Thaddeus, P. 1987, ApJ, 322, 706
- [4] Dame, T. M., Hartmann, D., & Thaddeus, P., 2001, ApJ, 547, 792
- [5] Dobashi, K., Bernard, J. -P., Yonekura, Y., & Fukui, Y. 1994, ApJS, 95, 419

- [ 6 ] Hayashi, M., Hasegawa, T., Sunada, K., & Kaifu, N. 1990, in *Submillimetre Astronomy*, ed. G. D. Watt & A.S. Websster (Dordrecht: Kluwer), 63
- [ 7 ] 海田正大，土橋一仁，桜井冬子，西浦慎悟，小川英夫，米倉覚則，中島拓，河野孝太郎，半田利弘，森野潤一，2005，東京学芸大学紀要 自然科学系，第57集，119-127
- [ 8 ] Kaifu, N., Ukita, N., Chikada, Y., and Miyaji, T. 1977, *PASJ*, 29, 429
- [ 9 ] Kooi, J. W., Chattopadhyay, G., Thielman, M., & Phillips, T. G. 2000, *Internat. J. Infrared and Millimeter Waves*, 21, No. 9
- [ 10 ] Oka, T., Hasegawa, T., Hayashi, M., Handa, T., & Sakamoto, S. 1998a, *ApJ*, 493, 730
- [ 11 ] Sakamoto, S., Hasegawa, T., Hayashi, M., Handa, T., & Oka, T. 1995, *ApJS*, 100, 125
- [ 12 ] Schieder, R., Tolls. V., & Winnewisser. G., 1989, *Exp. Astron.* 1, 101-121
- [ 13 ] Takano, T., Ogawa, H., Kato, T., Fujimoto, M., Fujimoto, Y., Fukui, Y., Hayashi, Y., Kawabata, K., Kawabe, R., & Sofue, Y. 1983, *PASJ*, 35, 323

