



東京学芸大学リポジトリ

Tokyo Gakugei University Repository

ミリ波電波望遠鏡のためのアンテナ温度較正用回転 チョッパーの開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2009-04-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 海田, 正大, 土橋, 一仁, 櫻井, 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 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2309/35446

ミリ波電波望遠鏡のためのアンテナ温度較正用回転チョッパーの開発

海田 正大*・土橋 一仁*・櫻井 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****

宇宙地球科学

(2005年5月27日受理)

KAIDEN, M., DOBASHI, K., SAKURAI, T., NISHIURA, S., OGAWA, H., YONEKURA, Y., NAKAJIMA, T., KOHNO, K., HANDA, T. & MORINO, J.: Development of rotary chopper for calibration of antenna temperature for millimeter wave radio telescopes. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Natur. Sci. 57: 119-127 (2005) ISSN 1880-4330

Abstract

In this paper, we report on the development of a rotary chopper for the millimeter-wave telescopes to calibrate the antenna temperature. The chopper is designed so that (1) the rotational speed can be changed smoothly and continuously, (2) the wheel of the chopper can be accurately set to an appropriate position within a short time, and (3) it can be installed flexibly even in a compact receiver cabin. We installed the chopper in the 60cm radio telescope, and carried out experimental observations in March, 2005. As a result, we successfully observed the $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ and $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ emission lines at 200 GHz toward Orion KL, confirming the performance of the chopper. (in Japanese)

Key words: millimeter-wave radio telescope, chopper-wheel, radio astronomy

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

1. はじめに

現代天文学において、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。コロンビア大学の1.2m電波望遠鏡(例えば, Dame et al., 1987)や名古屋大学の4 m電波望遠鏡(例えば, Dobashi et al., 1994や Yonekura et al., 1997)を用いて行われたサーベイ観測によって、銀河系内の分子雲の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。東京学芸大学では、大阪府立大学及び東京大学との協力のもと、

60cm電波望遠鏡 Very Small Telescope (VST) のリニューアルに取り組んでいる(以下VSTリニューアル計画)。VSTリニューアル計画の目標は、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2SB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。2SB受信機の開発と共に、受信機の仕様に適した新しい光学系、2系統のIF系、2台の音響光学型分光計及び回転チョッパーの開発・製作も併せて行っている。さらに計算機も旧来のDOSからLinuxベースに移行し、望遠鏡の制御

* 東京学芸大学 (184-8501 東京都小金井市貫井北町4-1-1)

** 大阪府立大学 (599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

*** 東京大学天文学教育センター (181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1)

**** 国立天文台 (181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1)

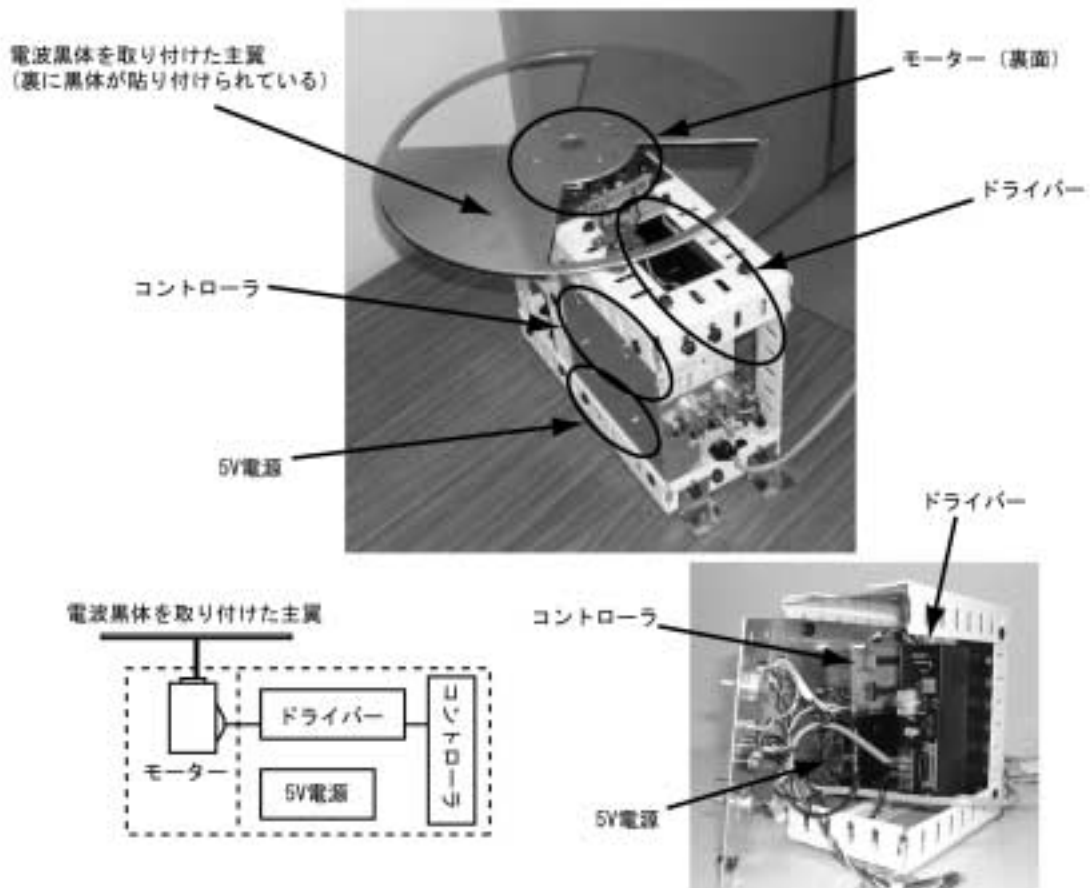


図1 製作したチョッパーの写真及びブロック図
 チョッパーはモーター，ドライバー，コントローラ及び5V安定化電源から構成されている。

システムの開発・改良を行っている。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)。

本論文では、ステッピングモーターを用いたミリ波電波望遠鏡のための回転チョッパーの開発について報告する。チョッパーは、アンテナ温度の較正に用いられる装置で、電波黒体を取り付けた主翼をステッピングモーターで回転させ、受信機のホーンの手前でチョッピング (出し入れ) させる装置である (図1)。我々は、回転チョッパーの開発を行う上で、(1) チョッパーの回転速度を安定かつ連続的に変化させることが可能であること、(2) 電波黒体を取り付けた主翼の位置を正確かつ短時間で制御できること、(3) コンパクトな受信機室内でも柔軟に設置できること、という3点に留意して開発を行った。(1)については、モーターの駆動パルス源に非安定マルチパイプ型の変調周波数発振器を導入して対応した。また、チョッパーの表面パネル上のボリュームで容易に回転速度の調節を行えるよう工夫した。(2)に

ついては、主翼と同時回転する同型縮小型の位置検出用の小羽を設け、この小羽の位置を2個のフォトインタラプタでモニターすることにした。また、60cm望遠鏡のシステムに対応したコントローラを、独自に設計・製作した。(3)については、筐体をL字アングルで製作することで対応した。

以下第2章では、ミリ波観測で大気吸収の補正に用いられる一般的な手法であるチョッパーホイール法について説明する。第3章では、チョッパーの製作方法について述べる。第4章では、製作したチョッパーを利用して行った60cm望遠鏡の試験観測の結果について報告する。第5章で、本論文の結論を述べる。

2. チョッパーホイール法

チョッパーホイール法とは、大気吸収の補正に用いられる一般的な手法である (例えば赤羽他, 1988)。天体から受信した電波強度はレイリー・ジーンズの法則を用いてアンテナ温度に変換される。ミリ波領域においてもレイリー・ジーンズの法則が成り立つと仮定すると、天体の電波強度 I は

3. チョッパーの製作

$$I = \frac{2kT}{c^2} \nu^2 \quad (1)$$

となり、天体の温度 T に比例する。ここで、 k はボルツマン定数、 c は光速、 ν は周波数である。

チョッパーホイール法は、ほぼ黒体とみなせる吸収材（電波黒体）を受信機のホーンの前に出し入れ（チョッピング）して、電波黒体を見たときの受信電波の強さと、電波黒体がないときの空からの電波の強さとの差を、電波強度標準として使う方法である（Kutner & Ulich, 1981）。

受信機が感じる電波強度（温度）には、天体からの信号の他に大気の放射によるものと受信機自体が持つ雑音温度が含まれる。そこで、天体の方向を見た時に受信機が感じる大気込みの電波強度（ T_{on} ）、天体の無い方向を見たときに受信機が感じる大気込みの電波強度（ T_{off} ）、常温の電波黒体を受信機のホーンの前に置いたときの電波強度（ T_{abs} ）を測定し、天体のアンテナ温度（ T_a ）を求める。 T_{on} 、 T_{off} 、 T_{abs} はそれぞれ、

$$T_{on} = T_a \exp(-\tau) + T_{atm} \{ 1 - \exp(-\tau) \} + T_{rx} \quad (2)$$

$$T_{off} = T_{atm} \{ 1 - \exp(-\tau) \} + T_{rx} \quad (3)$$

$$T_{abs} = T_{amb} + T_{rx} \quad (4)$$

と表される。ここで、 T_{atm} は大気温度、 T_{amb} は黒体の温度（300K）、 T_{rx} は受信機の雑音温度、 τ は大気の光学的厚さである。 $T_{amb} = T_{atm} = 300\text{K}$ と仮定すると、式(2) - (4)より、

$$T_{on} - T_{off} = T_a \exp(-\tau) \quad (5)$$

$$T_{abs} - T_{off} = T_{amb} \exp(-\tau) \quad (6)$$

が得られる。この2式と $T_{amb} = 300\text{K}$ より、

$$\begin{aligned} T_a &= T_{amb} \frac{T_{on} - T_{off}}{T_{abs} - T_{off}} \\ &= 300 \times \frac{T_{on} - T_{off}}{T_{abs} - T_{off}} \quad (7) \end{aligned}$$

となり、大気の吸収分を補正した天体のアンテナ温度 T_a が求められるのである。

図1は製作したチョッパーの概略図と写真である。チョッパーは、電波黒体を取り付けた主翼、モーター、ドライバー、コントローラ、5V安定化電源から構成されている。モーターとドライバーにはオリエンタルモーター社製のAS66AA-T3.6を利用し、コントローラは独自に設計・製作した。5V安定化電源はサンハヤト製の5V用直流安定化電源キット（DK-803）を使用した。使用した物品のリストを表1にまとめる。

3.1 コントローラ

3.1.1 可変周波数発振器（非安定マルチバイブレータ）の製作

モーターの駆動パルス源として、非安定マルチバイブレータ型の可変周波数発振器を製作した（図2）。図2の可変抵抗 R_1 を0 ~ 100k の範囲で変化させると、430Hz ~ 9 kHzの範囲で発振周波数を連続的に変えることができる。モーターの回転速度はドライバーに入力するパルスの周波数に比例する。従ってチョッパーの回転速度は、発振器の発振周波数に比例する。 R_1 にはつまみ式の可変抵抗器を使用し、チョッパーの表面パネルで発振器の発振周波数を連続的に変えることが出来るようにした。これによって、チョッパーの回転速度を8rpm（50°/秒）~ 170rpm（1000°/秒）まで安定かつ連続的に変えることが出来るようになった。

3.1.2 コントローラ回路の製作

チョッパーのコントローラ回路はTTLを用いて製作した。図3にコントローラの論理回路を示す。コントローラの信号の入出力を表2に示す。コントローラ回路の入力は3点切り替えのスイッチ1（以下SW1）とセンサ1、センサ2（以下S1, S2）である。SW1ではPC入力、R（LOCAL）、SKY（LOCAL）の3種類の入力の切り替えを行う。S1とS2は電波吸収材を取り付けたチョッパーの羽の有無をモニターし、羽有りの場合には5V、羽無しの場合には0Vをコントローラ回路へ出力する。

コントローラ回路からの出力は、3点切り替えのスイッチ2（以下SW2）とStatus出力である。スイッチ2では、ドライバーへの出力の切り替えを行う。出力の種類は、PC又はLOCAL、停止、連続回転の3種類である。に設定した場合には、SW1で指示された状態でチョッパーが停止する。に設定した場合、SW1の設定によらずチョッパーは強制的に停止する。

表1 部品リスト

	品名	メーカー・規格	数量	単位	単価(円)	金額(円)
1	モータセット	オリエンタルモーター AS66-T3.6	1	セット	101,178	101,178
2	安定化電源キット	サンハヤト DK-803	1	台	3,220	3,220
3	基板	サンハヤト ICB-93SG	1	枚	280	280
4	IC	TC4011BP (CMOS)	1	個	40	40
5	IC	SN7404N (TTL)	1	個	92	92
6	IC	SN7432N (TTL)	1	個	92	92
7	IC	M74LS08	2	個	40	80
8	ICソケット	14ピン用	5	個	115	575
9	可変抵抗	100k Ω	1	個	115	115
10	抵抗	2k Ω 、500 Ω	各2	個	12	48
11	抵抗	1M Ω 、100k Ω 、5k Ω	各1	個	12	36
12	コンデンサー	0.01 μ F	2	個	12	12
13	三点切替スイッチ	3接点4回路ロータリタイプ	1	個	360	360
14	電源スイッチ	電源用	1	個	290	290
15	ラベル	電源用	2	個	115	115
16	つまみ	ロータリースイッチ用	2	個	120	120
17	つまみ	可変抵抗用	1	個	364	364
18	アルミ板	200 \times 200 \times 3mm、200 \times 200 \times 2mm	各1	枚		
19	フォトインタラプタ	SHARP GP1L57 (Wide Gap Type Photointerrupter)	2	個		
20	ダイオード	電源用発行ダイオード	1	個		
21	L字アングル	300mm	4	本		
22	L字アングル	600mm	1	本		
23	モーター用延長ケーブル	オリムベクスタ CC36D1-1	1	本	7,568	7,568
24	モーター用中継ケーブル	オリムベクスタ CC03AIP	1	本	8,140	8,140

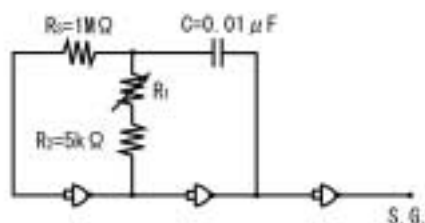


図2 非安定マルチバイブレータ型の変周波数発振器。図中の可変抵抗器 R_1 (0~100k)を変化させると、発振周波数は0.43~9kHzの範囲で変化する。これはモーターの回転速度で8rpm(50°/秒)~170rpm(1000°/秒)に相当する。

に設定した場合、SW1の設定によらずチョッパーは回転し続ける。Status出力は、チョッパーの状態をモニターするのに用いる。チョッパーが停止している場合ready信号(5V)を、回転中の場合unready信号(0V)をPCへ出力する。制御側ではこのStatus出力を用いて、チョッパーの状態をPCでモニターする。

3.1.3 フォトインタラプタ部の製作

羽の位置を検出するセンサとしてSHARP製 GP1L57 (Wide Gap Type Photointerrupter)を採用した。GP1L57の外観図を図4aに示す。GP1L57は、幅が広く(約10mm)、溝が深いタイプ(約12mm)のフォトインタラプタである。フォトインタラプタをチョッパー本体に取り付けた様子を図4bに示す。フォトインタラプタはダイオードとフォトトランジスタの間に遮断物が無い時、ダイオードが発した赤外線信号をフォトラン

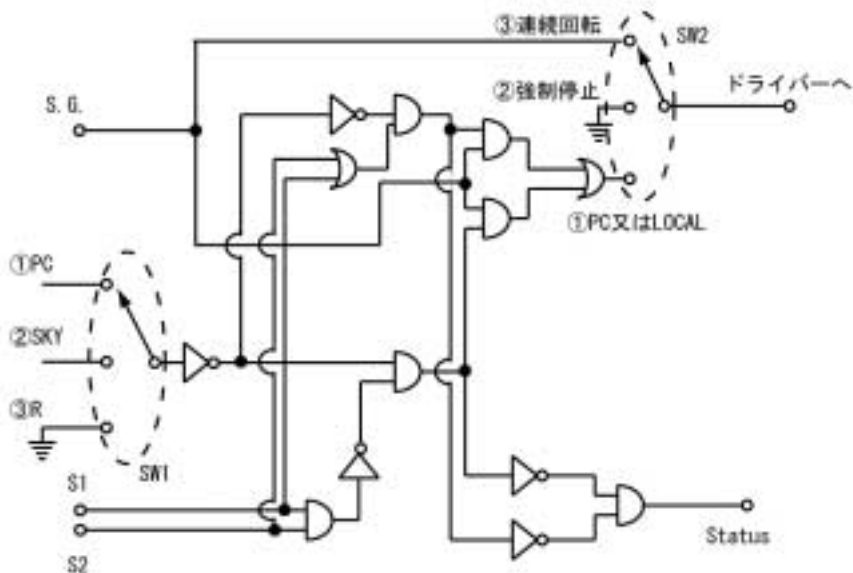


図3 コントローラの論理回路

表2 コントローラ回路の入出力表

名前	入力			出力		
	SW1	S1	S2	SW2	Status	
入力元又は出力先	PC 又は 5V 電源	フォトインタラプター		ドライバー	PC	
動作及び入出力電圧	REMOTE	R:0V SKY:5V	羽有り:5V	羽有り:5V	PC 又は LOCAL	Ready:5V
	LOCAL	R:0V	羽無し:0V	羽無し:0V	停止:0V	Unready:0V
	LOCAL	SKY:5V			連続回転	

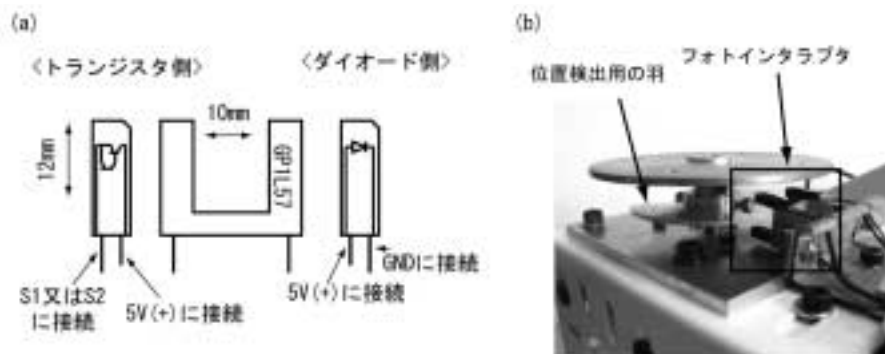


図4 (a)フォトインタラプタGP1L57の概観図
(b)モーター上部に設置したフォトインタラプタと位置検出用の羽

ジスタが受けて、コレクタ電流 I_C が流れる(図5 a)。位置検出用の小羽が、ダイオードとトランジスタの間を遮断するとコレクタ電流が止り、図5 aの V_{CE} が変化する。この電圧の変化を利用して、羽の位置を検出する。そこで我々は、主翼と同時回転する位置検出用の小羽を、2個のフォトインタラプタでモニターすることにした。これにより、R-SKY切り替え信号(図3のSW1)受信後、電波黒体(主翼)の位置を短時間で正確に設定できるようになった。

フォトインタラプタの電気特性を調べるために図5 aの回路を製作し、ダイオード電流 I_F をパラメータとしてコレクタ電流 I_C 、コレクタ・エミッタ電圧 V_{CE} の関係を測定した(図5 c)。 $I_F=2\text{ mA}$ とした時、ダイオードとフォトトランジスタの間に遮断物が無い時の V_{CE} の値は約1VとなりTTLレベルの0(0V~0.8V)の範囲に収まらないため、コントローラ回路への出力には抵抗 R_L にかかる電圧 V_L を用いた(図5 a)。 V_L がTTLレベルの1(2.0V~5.0V)、0(0V~0.8V)の範囲に収まるよう

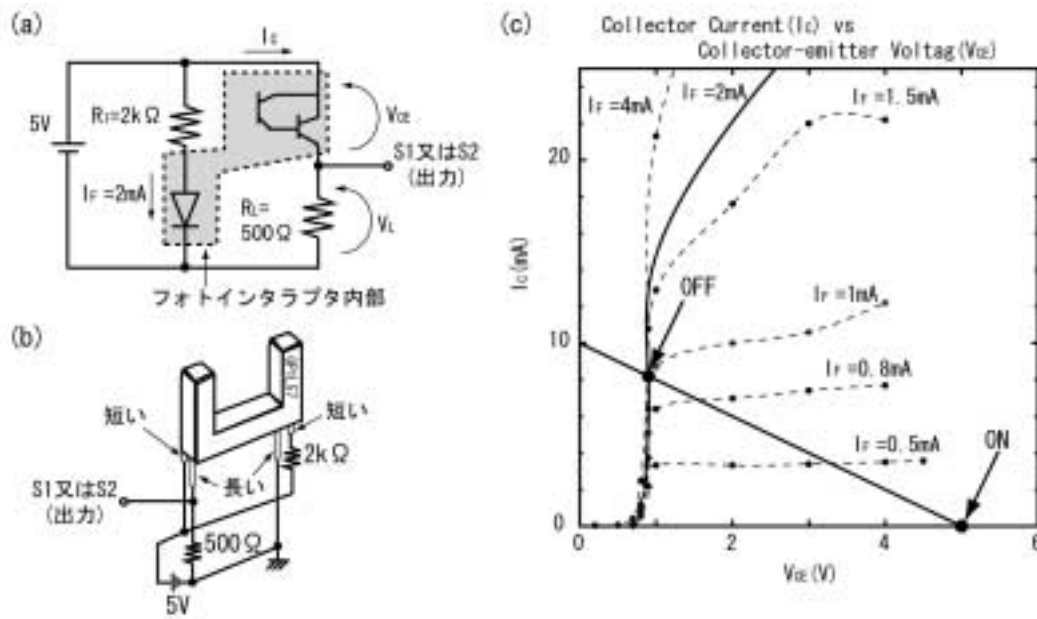


図5 (a)フォトインタラプタと周辺回路。図中のグレで示した部分は、フォトインタラプタ内部の回路である。(b)フォトインタラプタの実体配線図。(c)フォトインタラプタの I_C 対 V_{CE} の測定結果(図中の黒丸は測定値)。図中のONはダイオードとトランジスタの間に遮断物がある時、OFFはダイオードとトランジスタの間に遮断物が無い時の駆動点である。太い実線は $I_F=2mA$ の時の I_C 対 V_{CE} の特性を示している。

にフォトインタラプタの駆動点を決めた(図5cの点ONとOFF)。これらの駆動点を得るために $R_1=2k$, $R_L=500$ としフォトインタラプタの周辺回路を製作した。図5bにフォトインタラプタ周辺回路, 図6にコントローラ回路全体の实体配線図を示す。

3.2 モーター, ドライバー及びコントローラの接続

電波黒体を取り付けた主翼を回すモーターには、オリエンタルモーター社製脱調補正つきステッピングモーターAS66AA-T3.6を採用した。モーター, ドライバー, コントローラの接続の概略を図7aに示す。コネクタピンの機能は、付属の取り扱い説明書に記載されている。使用したピンは1, 2, 11, 12の4つのピンである。それぞれのピンのコントローラ側の接続先を図7aに示す。また, 図7bにドライバーの正面パネルを, 図7cにコントローラとドライバーをつなぐコネクタを示す。

3.3 5V安定化電源の製作

サンハヤト社製5V安定化電源キットを購入し、付属の取り扱い説明書に従って製作した。完成した安定化電源をチョッパー側面のアルミ板に取り付けた。

3.4 チョッパーの筐体及び主翼の製作

電波黒体を取り付ける主翼, シャフト, 位置検出用の小羽及びモーター固定用のアルミ板2枚を光学系, 筐体に合わせて設計・製作した。チョッパーの筐体を受信機室内で柔軟に設置できるようにL字型アングルで製作し, 上面と側面にアルミ板を張った。

3.5 完成したチョッパー

完成したチョッパーの写真を図8に示す。チョッパーの正面パネルの機能を図9にまとめる。60cm電波望遠鏡の受信機室に, 完成したチョッパーを設置し(図8), 制御実験を行った。観測室のPCからR-SKYの切り替えを行い, 製作したチョッパーが正常に動作することを確認した。

4. 60cm望遠鏡の試験観測

2005年3月に, 新光学系, 2SB受信機, 2系統のIF系, 2台の音響光学型分光計, 及び本研究で開発した回転チョッパーを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}CO

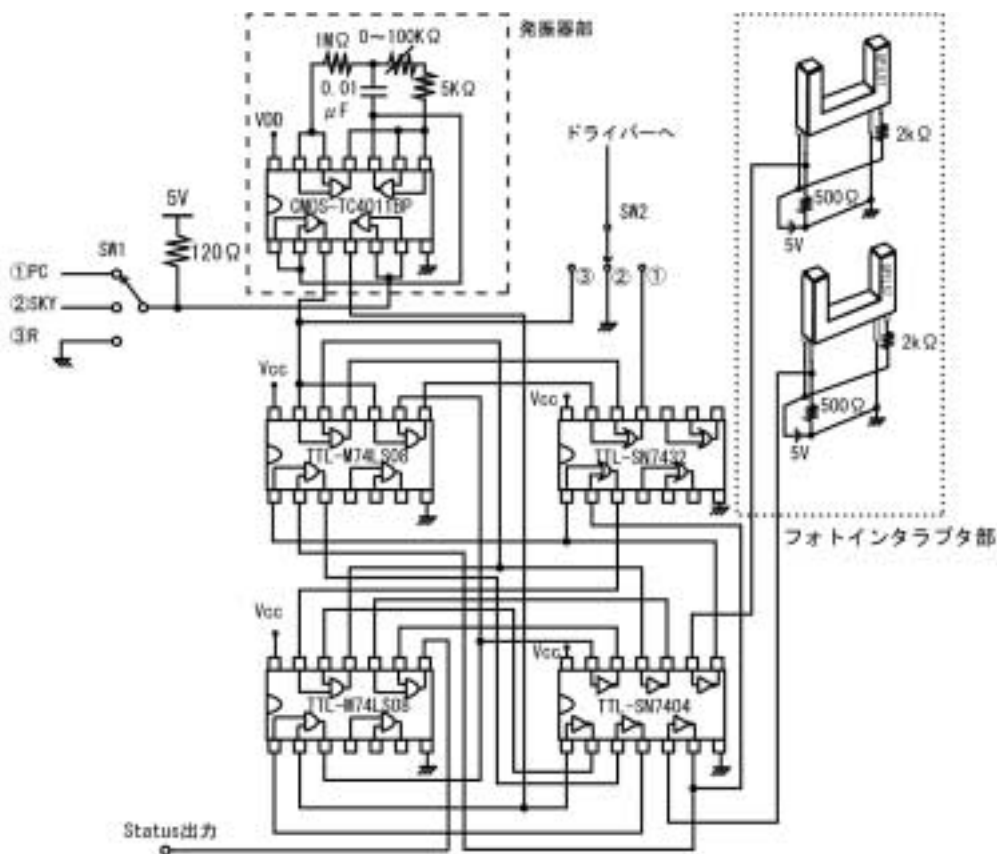


図6 図3に示したコントローラの実体配線図。図の左上の破線で囲まれた部分は図2に示した発振器の実体配線図である。図の右上の点線で囲まれた部分は図5に示したフォトインタラプタの実体配線図である。

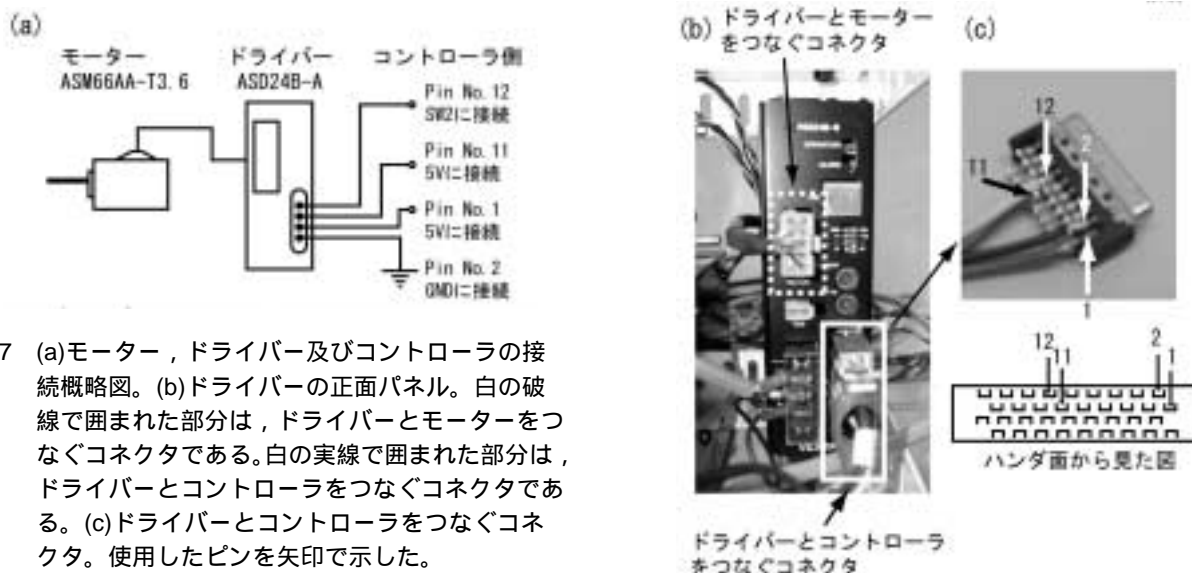


図7 (a)モーター，ドライバー及びコントローラの接続概略図。(b)ドライバーの正面パネル。白の破線で囲まれた部分は，ドライバーとモーターをつなぐコネクタである。白の実線で囲まれた部分は，ドライバーとコントローラをつなぐコネクタである。(c)ドライバーとコントローラをつなぐコネクタ。使用したピンを矢印で示した。

($J=2-1$) 分子輝線及び220.398GHzの ^{13}CO ($J=2-1$) 分子輝線の同時受信を目指した。

試験観測では，まず，望遠鏡をOrion KL天体に向けた時のデータ(式7の T_{on})，空に向けた時のデータ(式7の T_{off})及び受信機のホーンの手前に電波吸収体(回転チョッパー)を置いた時のデータ(式7の T_{abs})の計3種類のデータを取得した。積分時間はそれぞれ

1分であった。次に，得られた3種類のデータを式7に代入して，大気の吸収分を補正したアンテナ温度を計算した(式7の T_a)。当初の目標通り， ^{12}CO 及び ^{13}CO 分子輝線を同時に検出することができた。得られた分光データ(T_a)を図10に示す(ビーム能率等，望遠鏡のパラメータをまだ測定していないため，図10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

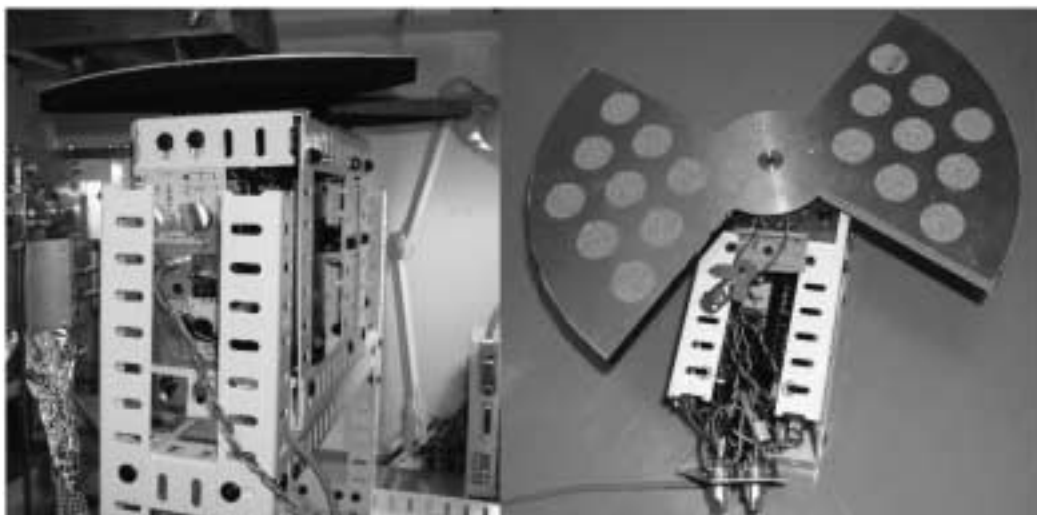


図8 受信機室に設置したチョッパー

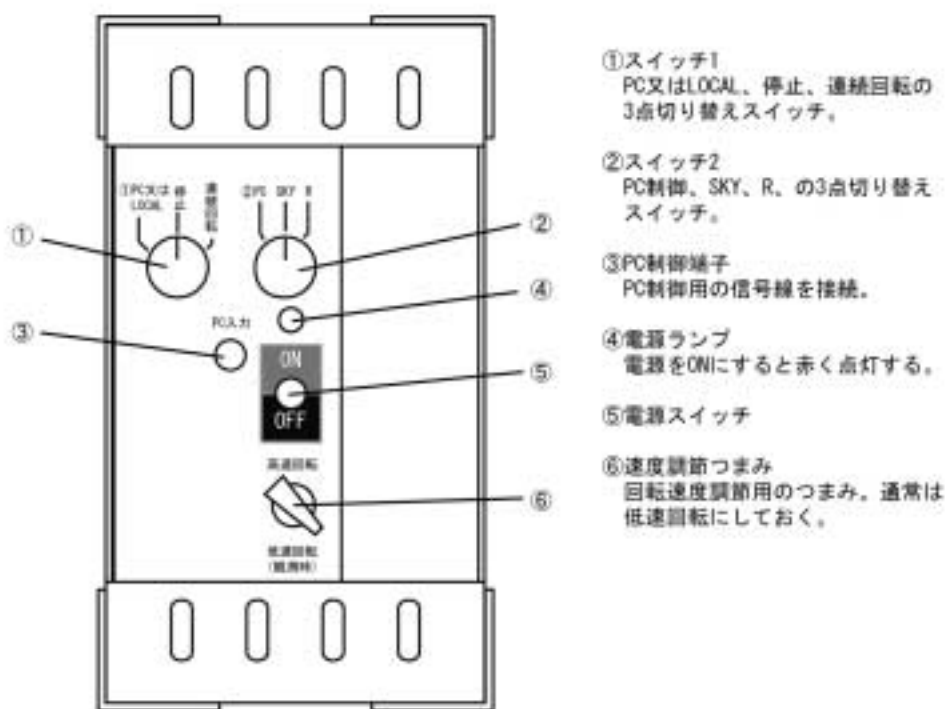


図9 チョッパーの正面パネルと機能の一覧

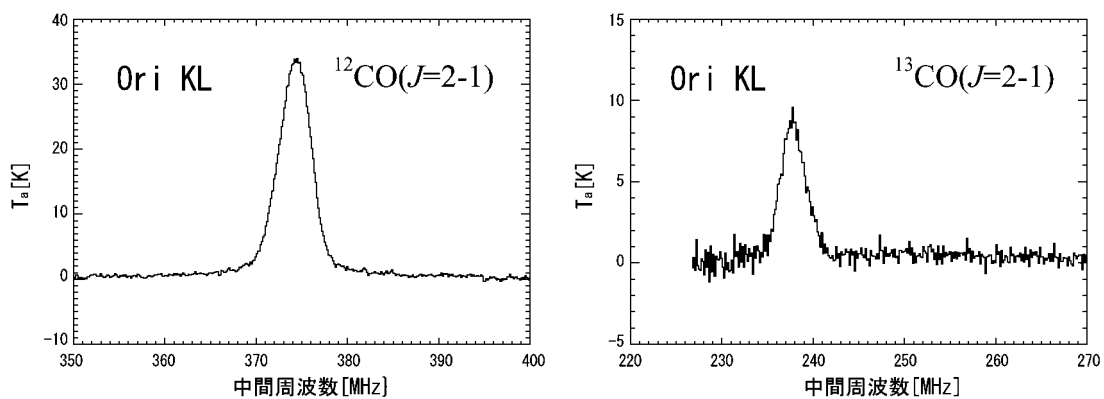


図10 Orion KL天体に対する試験観測で得られた分光データ。左が静止周波数230.538GHzの $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 分子輝線で、右が静止周波数220.398GHzの $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ の分子輝線である。

なる訳ではない)。試験観測中，開発したチョッパーは受信機のホーンの手前で指示通りにチョッピングした。これにより，製作したチョッパーの基本動作に問題がなく，アンテナ温度の較正に用いることが出来ることを確認できた。

5. まとめ

本研究では，ミリ波電波望遠鏡のための温度較正用回転チョッパーの開発を行った。製作したチョッパーは，国立天文台野辺山宇宙電波観測所の構内に設置されている60cm電波望遠鏡に搭載した。2005年3月にOrion KL天体に対して試験観測を行い，200GHz帯の ^{12}CO ($J=2-1$) 及び ^{13}CO ($J=2-1$) 分子輝線を検出した。以下に製作したチョッパーの特徴をまとめる。

- (1) モーターの駆動パルス源として可変周波数発振器 (CMOS非安定マルチバイブレータ) を導入したことにより，回転速度を8rpmから170rpmまで安定かつ連続的に変化させることができる。
- (2) 電波黒体を着装した主翼の下に，主翼と同時回転する同型縮小型の小羽を設け，その小羽の位置を2個のフォトインタラプタによりモニターさせた。これにより，R-SKYの切り換え信号受信後，電波黒体 (主翼) の位置を短時間 (2秒以内) で正確に設定できる。
- (3) 筐体をL字アングルで作製したことにより，狭い受信機室内でも柔軟に設置できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，作業時にお世話になった国立天文台野辺山太陽電波観測所長柴崎清澄教授と国立天文台野辺山太陽電波観測所の皆様に感謝します。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17540214) による資金的援助を受けました。

引用文献

- 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, 38P
- Dame, T. M., Ungerechts, H., Cohen, R. S., de Geus, E. J., Grenier, I. A., May, J., Murphy, D. C., Nyman, L. A., & Thaddeus, P. 1987, ApJ, 322, 706
- Dobashi, K., Bernard, J. -P., Yonekura, Y., & Fukui, Y. 1994, ApJS, 95, 419
- Hayashi, M., Hasegawa, T., Sunada, K., & Kaifu, N. 1990, in Submillimetre Astronomy, ed. G. D. Watt & A. S. Webster (Dordrech: Kluwer), 63
- Kutner M. L., & Ulich B. L., 1981, ApJ 250, 341
- Sakamoto, S., Hasegawa, T., Hayashi, M., Handa, T., & Oka, T. 1995, ApJS, 100, 125
- Yonekura, Y., Dobashi, K., Mizuno, A., Ogawa, H., & Fukui, Y. 1997, ApJS, 110, 21