

# 電波望遠鏡用プリアンプ・ドライバの製作

山崎高幸

教育・研究技術支援室 計測・制御技術系

## 概要

太陽地球環境研究所太陽圏環境部門では 1970 年代から電波望遠鏡を用いた太陽風の観測を行っている。この電波望遠鏡は南北に回転するシリンダーパラボラ反射面とその焦線部（東西方向）に設置されたフェーズドアレーにより機械的、電氣的に星を追尾する方式をとる。フェーズドアレーは移相器・可変減衰器内蔵型前置増幅器（プリアンプと呼称）により指向制御しており、観測中は天体を追尾するため頻繁にプリアンプを制御する必要がある。制御は PC からの命令により行われるが、この命令をプリアンプの制御信号に変換するための回路が、今回製作したプリアンプ・ドライバである。これまで用いていたプリアンプ・ドライバは 1970 年代後半に製作されたものであり、故障した場合に交換部品の入手困難などの理由より、長期間、観測停止に追い込まれることが懸念されていた。

この問題を解消するために、富士観測所・菅平観測施設用に新しいプリアンプ・ドライバ回路を製作し、2012 年の冬期観測休止期間中に古いシステムと入替えを行った。開発にあたっては、以下に挙げる保守のしやすさに留意した。

- 部品調達が長期間容易であること
- 故障個所の特定が容易であること

その結果、従来発生していた制御不良は解消され、長期運用への信頼性が大幅に向上した。

本稿では、新しいプリアンプ・ドライバ回路の製作と、現地への設置報告を行う。

## 1 太陽風観測

### 1.1 電波望遠鏡を用いた太陽風観測

太陽地球環境研究所では、国内4ヶ所（豊川、富士、木曾、菅平）に設置した電波望遠鏡（観測周波数：327 ±10MHz）により、惑星間空間シンチレーション（Interplanetary Scintillation：IPS）観測による太陽風の研究を行っている。遠方にある視直径の小さい電波天体を観測するとき、太陽から吹き出るプラズマが観測視線方向を横切ることによって電波強度が変動する。この（観測視線を横切った太陽風の情報を含む）変動が IPS であり、多地点で同一天体の同時 IPS 観測を行うことで、太陽風の速度を導出することができる[1]。

IPS 観測に用いている電波望遠鏡（図1）は、主鏡であるシリンダーパラボラ反射面と焦線部に置かれたフェーズドアレーで構成される。主鏡の反射面は3cm 間隔で張られた直径0.3mm のステンレス線からなり、約 2000m<sup>2</sup>の開口面積をもつ[2]。

反射面で集束した電波は、フェーズドアレーで受信する。フェーズドアレーは東西方向に並べられたダイポールアンテナと移相器・可変減衰器内蔵型前置増幅器により構成される。フェーズドアレーは、各アンテナの給電位相を変えることで天体を電氣的に追尾することができ、移動体通信やレーダー等によく用いられている技術である[3]。

## 1.2 フェーズドアレーの制御

図2は、天体からの電波が平行に来るとき、隣接するアンテナとの電波の通路差を表すものである[4]。

この通路差は、アンテナが間隔  $d$  (m) で並んでいるとき、子午線からの角度を  $\theta(^{\circ})$  とすれば、 $d \cdot \sin\theta$  で表される。仮に図2の左のアンテナに  $d \cdot \sin\theta$  に相当する位相差 ( $2\pi d \cdot \sin\theta / \lambda$ 、 $\lambda$  : 観測波長) を与えれば、2つのアンテナの出力は角度  $\theta$  方向からくる電波の位相が一致するため合成すると互いに強め合う。すなわち、アンテナの最大利得を  $\theta$  方向に変えることができる[3]。この操作を行う回路が移相器であり、多くのアンテナを並べて移相制御するタイプのアンテナをフェーズドアレーと呼ぶ。また、フェーズドアレーでは多くのプリアンプが必要となるため、微弱な電波をとらえなければならない観測用途では、プリアンプ個体の利得のばらつきを校正するための可変減衰器も内蔵する必要がある[5]。

IPS 用電波望遠鏡では、各プリアンプは隣り合う2本のダイポールアンテナの合成信号を増幅し、位相・利得調整を行う計96台のプリアンプがフロントエンドダクトと呼ぶ長い BOX 内に1.03m 間隔で設置されている (図3)。プリアンプの制御は、8台ずつディージーチェーン接続されたものを1ブロックとして、全体では12ブロックから構成されている。これらはアンテナ近くの観測小屋のプリアンプ・ドライバと12本の制御ケーブルと1本のアドレスケーブルで接続される (図4)。これにより富士観測所では、ほぼ瞬時に全プリアンプの位相切替えができる。プリアンプから出力された信号はトーナメント式に合成を繰り返し、1本にまとめられたのちアンテナ小屋で中継され観測棟のバックエンドへ入力される。

## 2 回路設計

### 2.1 開発のいきさつ

図5は旧プリアンプ・ドライバ回路である。製作されてから既に30年以上も使われ続け、回路全体が塵などで汚れ、プリント基板コネクタなどが接触不良を起こしてプリアンプ制御が不安定になる可能性も高まっていた。また旧プリアンプ・ドライバ内蔵の制御プログラムは PROM にアSEMBラーを使って書かれており、現在では修正も作成もできなくなっている。さらに組み込まれている、STD-BUS 規格のワンボード CPU 基板は既に廃品種となっているため、故障した場合は観測が長期間に渡って停止に追い込まれる恐れがあった。

太陽地球環境研究所にはプリント基板加工機 (FP-31AT ミッツ株式会社) が2009年より導入され技術職員に利用されており[6]、加工範囲の300mm<sup>2</sup>内の大きさであれば、自由にプリント基板設計ができるようになっている。そこで今回 (2012年第3四半期)、プリアンプ・ドライバを更新するため、この基板加工機を用いて製作した。

表 1. 制御対象とビットの割当て

### 2.2 設計仕様

制御データは位相5ビット、利得は4ビットの計9ビットである (表1)。

制御アドレスは8ビットである。プリアンプ・ドライバは全96台のプリアンプを制御するため、12のセクションに分けて制御を行っている (図4)。

データ用の回路基板は12枚。1枚の基板で8台のプリアンプを制御する。

この96台のプリアンプは同じくプリアンプ・ドライバに接続されたアドレスケーブルによって識別されている。プリアンプ・ドライバ本体は、図6に示すように観測所 PC からの送信信号を光で受け、RS-485信号に変換される[7]。受信された制御信号は、信号・電源分配基板を経由し、全13枚の基板にツイストペアケーブルによって送られる (図7)。ドライバ回路でシリアルデータはパラレルデータに変換され、データ信号

Bit	No.9	No.8	No.7	No.6	
利得	1.6[dB]	0.8[dB]	0.4[dB]	0.2[dB]	
Bit	No.5	No.4	No.3	No.2	No.1
位相	180°	90°	45°	22.5°	11.25°

及びアドレス信号となる。各回路13枚は基板上のディップスイッチで固有の ID が割り当てられるが、今回、固有 ID は外部からも設定できるようコネクタを追加した。これは、観測テスト時にデバッグ等で基板 ID を変更したいとき、アンテナ小屋まで行かなくても、PC 側から基板 ID の切替えを可能にするためである。

1回のデータパケット（図8 黄色のグリッド）を12セクション分送信し、次に1つのアドレス（図8 青のパルス）を送る。これを8アドレス分繰り返すことで、全プリアンプに位相データ・利得データを設定することができる。

電源はプリアンプ・ドライバ本体下側の電源ボックスから供給され制御回路に5V 電源、リレー駆動用に15V を備えている。アンテナ小屋内の既存の19インチラックに、新たな BOX 内に基板を縦起きで格納する関係上、回路の物理サイズは、1枚幅120mm、長さ300mm 以内と決まった。

### 3 回路製作

#### 3.1 パターン設計

IC 数は 1 基板 10 以上に及ぶためまず製作する 2 種類の基板を試作し動作確認を行った。今回加工機を使って同品質の基板が作れるため、同じ観測システムを用いている富士観測所用と菅平観測施設用の 2 セット（1 セットはデータ基板 12 枚、アドレス基板 1 枚）を製作した。回路製作は、以下の A~E の手順で行った。プリントパターン設計ではディスクリート IC は自由に置けるが、制約を受けるものに基板の物理サイズ、コネクタ位置があり、最初にこれらを決める。次に IC 間の配線長を短くするよう位置を決め、入出力であるコネクタとディスクリート IC は先につなげる。その後は電源（+15V, +5V）、GND、信号とつなげる。回路は実際に信号が正しく送られていることを目視で確認するため LED を基板側面につけ、最終的に本体の全面から設定状態が確認できるようにした（図 9、図 10）。

A、回路設計 → B、パターン設計（Printed Circuit Board Emulator） → C、基板加工 →  
D、実装（図 9、図 10） → E、動作試験（図 11）

#### 3.2 回路動作確認

設計時には回路（図 14）を元に接続確認を全パターン念入りに行った。しかしまれに加工後の基板で、信号と信号の間にショートが見つかった。これは基板加工のドリルの刃が 0.3mm であるのに対して、パターン設計の線幅間隔が 0.3mm に満たない場合が多かったためである。パターン設計時に線幅間隔に余裕があるかのチェックを行うことが重要である。さらに試作機も一発動作しないため、全接続の導通確認を行い、配線ミスを修正した。また試作後にパターンを若干変更したため、再度検証に時間を要した。試作機を作った後は、パターンを変えないことが鉄則である。量産時プリント基板は 2 枚同時に加工機にセットし、製作過程を効率化した。動作試験はプリアンプ試験で定常的に使用している自作の制御データ送信器から制御信号を送り、対応した LED が点灯するか確認を行った（図 11）。

動作確認のテスト項目は、設定 ID での

- 制御信号のビットシフト。
- ALL “H” データの設定確認。
- ALL “L” データの設定確認。

及び、上記パターンの

- 非設定 ID での非動作（隣の ID など）確認である。

当然動かないものは、ハンダ未完了・ハンダ不良・接続ミス等あり、その都度に導通チェック及び波形確認などデバッグして全 30 枚（2 セット分及び予備）を製作した。製作した 2 セットの実機は名古屋大学東

山キャンパスにて観測所と同じようにセットアップされた PC と接続し、より詳細なテストプログラムによって動作確認し完成となった (図 12)

## 4 現地設置

### 4.1 初期トラブル

名古屋でのテストを終えたプリアンプ・ドライバ本体を 2012 年 1 月 16 日に富士観測所に設置した。しかし現地で実際にプリアンプ群と接続すると動作しなかった。原因調査した結果、出力電圧が負荷なしの状態では出力電圧が 12V であるのに対して (図 13 左) 負荷ありの状態の出力電圧が 5V で (図 13 右)、駆動対象のラッチングリレーの定格 12V に満たないからであるということが分かった。現地ではトランジスタのベース抵抗を下げるなど対策を行ったが改善せず、持ち帰りということになった。

### 4.2 トランジスタの交換

当初使用のアドレス・ドライバ用トランジスタ 2SB707 (80V/7A) は  $hFE : 40-200$  と小さくて、現地でベース抵抗を下げても十分な電流を流せなかった。対策としてダーリントン接続の 2SB1020A (100V/7A,  $hFE : 2000-15000$ ) に交換した。1月23日に富士観測所で再度設置して実負荷試験を行い、すべてのアドレスで電圧低下が生じないことを確認した。また出力波形が崩れないことも確認した。

### 4.3 菅平観測施設用プリアンプ・ドライバ

菅平観測施設の 1 セットについてもトランジスタを交換し 2 月に製作を終え、6 月に設置作業を行った。

### 4.4 プリアンプ送信データモニタ回路の製作

プリアンプ・ドライバ製作完了後、制御信号を常時チェックできるよう観測棟内にモニター用 LED 回路を製作した。これはプリアンプ・ドライバと主要部分が同様の回路である。そのためプリアンプ・ドライバの片面で実績のあるパターンを再利用し、両面基板で製作した。この回路を制御用 PC の出力に取付け、プリアンプ・ドライバの設定状態と、先だってフロントエンドダクト内の各制御ブロックに取り付けたモニター用回路の三者で比較を行うことで、制御データが正しく届いていることを確認した。またこのモニター回路の設置により、観測制御 PC からプリアンプまでの全過程で制御データが視認でき、障害発生時には故障個所の特定を速やかに行うことができるシステムを構築することができた。

## 5 まとめ

今回、太陽風観測用電波望遠鏡の老朽化したプリアンプ・ドライバの回路、及び周辺のモニター回路の製作を行い更新した。その後実施した天体電波源の試験観測では順調に動作し、アンテナの性能評価に用いている天体電波源の観測ではアンテナの感度の向上が認められたとの報告を頂いている。こうして安定かつ保守の容易な制御システムが実現でき、2012 年度の太陽風観測終了時 (12 月) まで今回更新した制御周りのトラブルは発生していない。今回の作業にあたり、具体的に良かった点・反省点・将来の発展の項目を列挙する。

### 【良かった点】

- LED を ON/OFF の 2 段式にしたのでセット/アンセットの状態が見やすい。また、データのモニターポイントを複数設置したので不具合の特定が容易。
- 予備基板を準備しているため、不具合があれば速やかな対応が可能。

- 新しいプリアンプ・ドライバは受動回路のみで構成されており、PC側のプログラム変更でプリアンプの多様な制御が可能。

#### 【反省点】

- トランジスタの電流容量を負荷計算して選定しなかったため、現場で動かなかったこと。

#### 【将来の発展】

- PCからボードIDを切替え、詳細なテストを実施する環境の構築。
- 基板設計で規模が大きい回路にも対応できるよう自動配線がある効率的なツールの検討。
- 利用価値の高い設計資産であるためFPGA版を作ること。

## 6 謝辞

設計・製作・設置にご協力頂いた太陽地球環境研究所・研究支援推進員の丸山一夫氏、技術専門職員の丸山益史氏、そして最後に本論文にご助言を頂いた太陽圏環境部門の藤木謙一博士に、心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 太陽風研究室 <http://stsw1.stelab.nagoya-u.ac.jp/swlab/index.html>
- [2] 桜井隆,小島正宜,他:『太陽』,(シリーズ現代の天文学10)日本評論社,2009年発行
- [3] 後藤尚久:『図説・アンテナ』,電子情報通信学会,1995年発行
- [4] 畑中武夫:『電波天文学』,(新天文学講座第10巻)恒星社厚生閣,1974年発行
- [5] 浅井紀久夫,小島正宜,他:『電波望遠鏡搭載フェーズドアレーシステムの利得・位相校正計測』,J79-B-2, p.994-1002,電子情報通信学会論文誌,1996年12月
- [6] 丸山益史,山崎高幸,他:『プリント基板加工機を用いたフィルタ回路の設計製作』(第5回名古屋大学技術研修会),2010年
- [7] 丸山一夫:『フェーズドアレーシステムの光通信制御』,p17-37,第5回技術研修報告,太陽地球環境研究所,1994年発行
- [8] 徳丸宗利:『太陽風の謎を探る新しい電波望遠鏡』,STEL Newsletter, No.56,2010年7月
- [9] 藤木謙一:『太陽風観測専用UHF望遠鏡の開発』,p.57-60,GCOE活動報告書,2009年
- [10] 後藤尚久:『電波とはなにか?』,電気通信振興会,2001年発行



図1 富士観測所の電波望遠鏡

弓状の構造の間にはピアノ線が張られている。

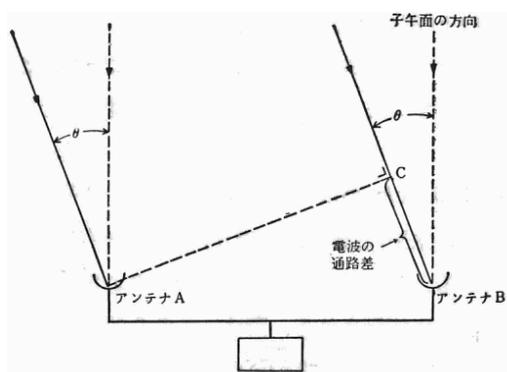


図2 電波干渉計の構成 [4] p.60より

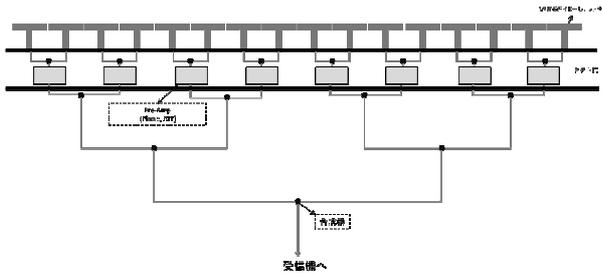


図3 ダイポールアレイとプリアンプ群 (部分)

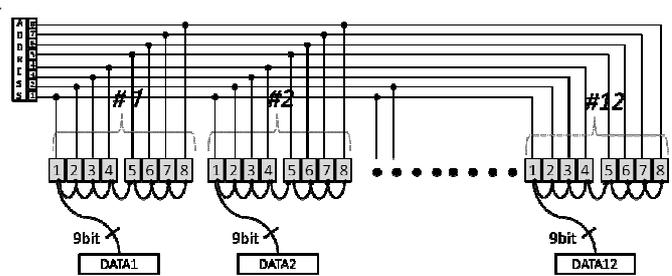


図4 プリアンプ制御線の結線図

8台のプリアンプを1セットとし、12本のデータ制御線と1本のアドレス線で制御する。



図5 旧プリアンプ・ドライバ  
(19 インチラックから取り外した後)

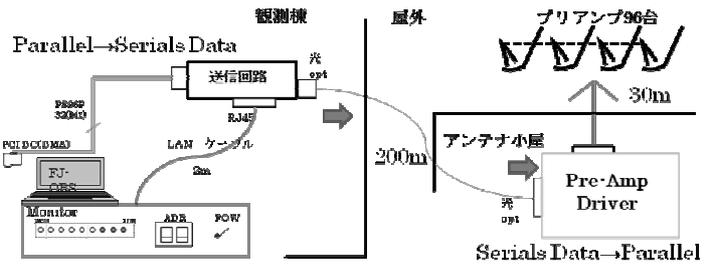


図6 観測棟からプリアンプまでの接続図

観測棟からアンテナ小屋までは光ケーブルが敷設されている。

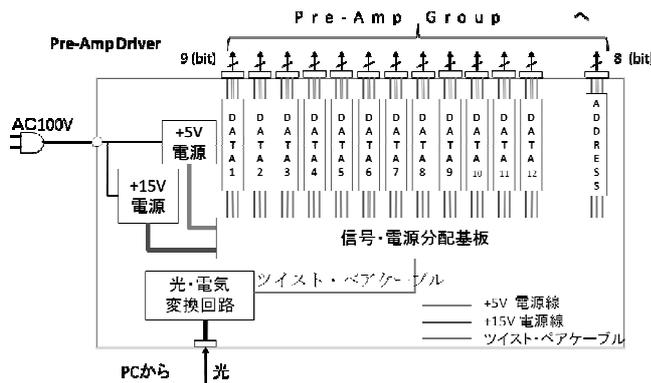


図7 プリアンプ・ドライバの構成 (DATA12 枚、アドレス 1 枚、電源及び光・電気変換回路で構成される)

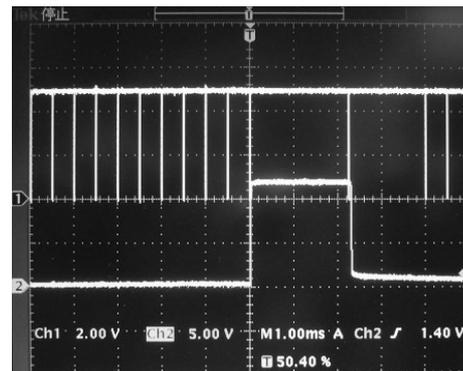


図8 制御パルス信号 (上: データライン 下: アドレスライン) データライン 12 パケット送信後、アドレスラインが立ち上がると、プリアンプ内のラッチングリレーがセットされる。

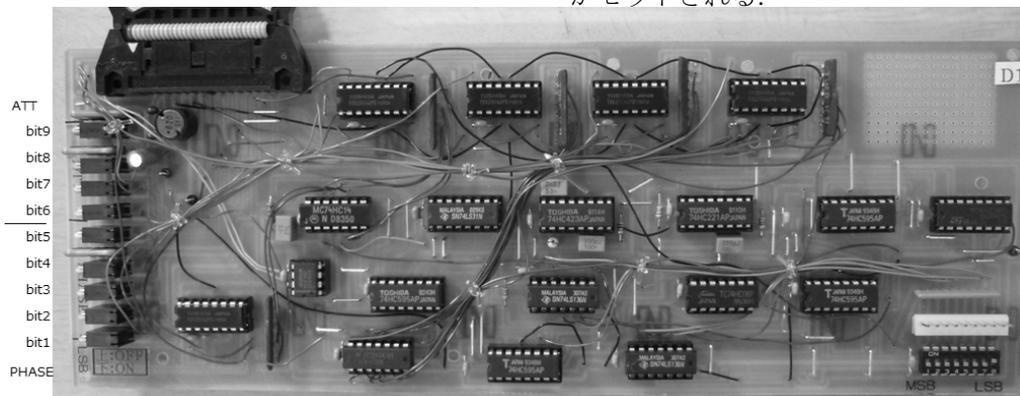


図9 プリアンプ・ドライバ (データ・ドライバ)

Bit の割り当ては表 1 参照、右下の白いコネクタがボード ID 用コネクタ

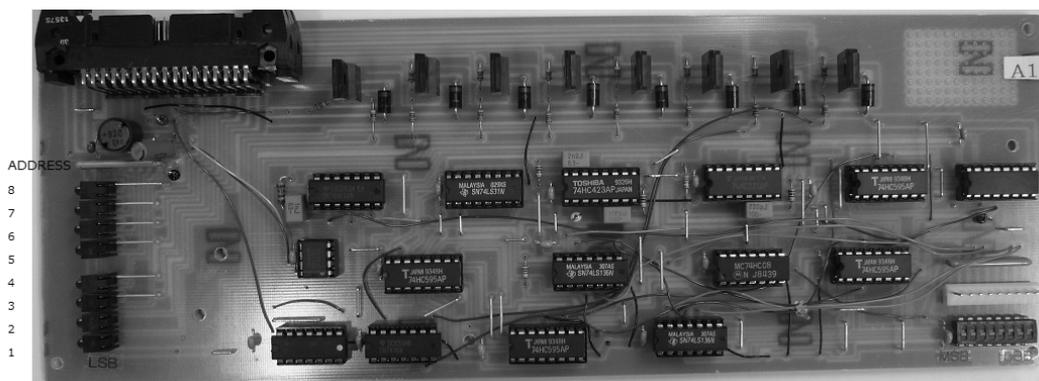


図10 プリアンプ・ドライバ (アドレス・ドライバ)  
上に並んだ8個のトランジスタはダーリントントランジスタ

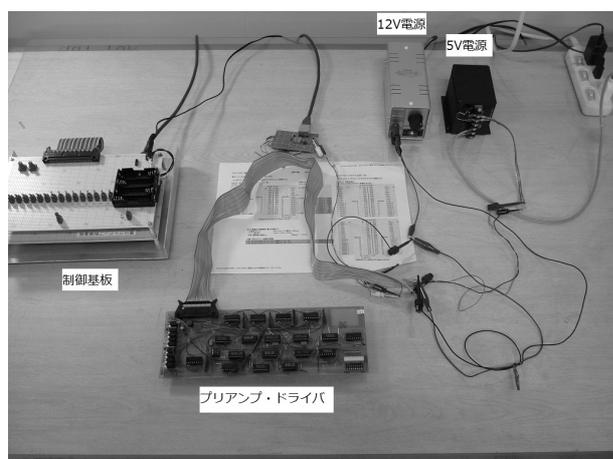


図11 動作試験の構成  
ドライバコネクタへ制御信号を入力し、LEDで表示されることを確認する。

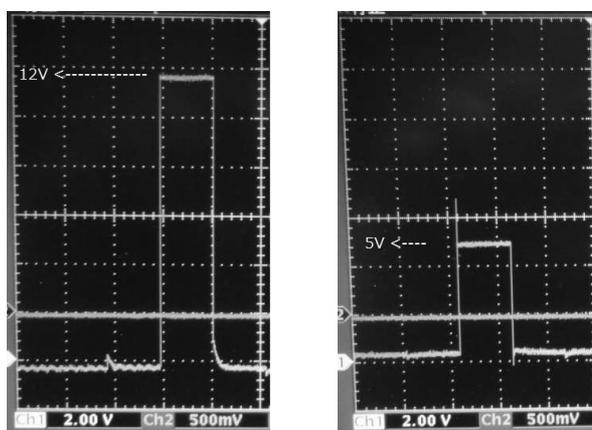


図13 制御パルス信号 (トランジスタ変更前)  
左: 負荷なしの出力電圧 右: 負荷ありの出力電圧

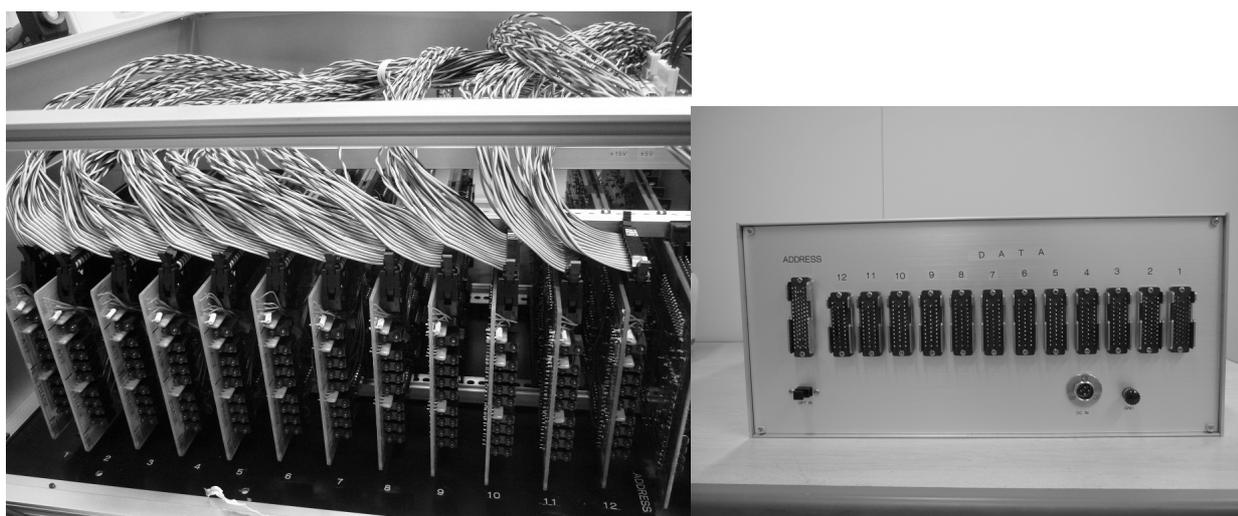


図12 プリアンプ・ドライバ全体 (前面: 左、背面: 右図)

- 次頁【図14 回路図 (上: データ・ドライバ回路図、下: アドレス・ドライバ回路図)】

