

## 講座

### プラズマ実験におけるデータ処理 I

## 2. 実験データの収集

中西 秀 哉

小 嶋 護

LABCOM グループ

(核融合科学研究所)

(1996年 8 月 6 日受理)

### Data Processing in Plasma Experiments — Data Acquisition

NAKANISHI Hideya, KOJIMA Mamoru and LABCOM Group

*National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan*

(Received 6 August 1996)

#### Abstract

The functions of data acquisition systems are described as a part of the data processing in plasma experiments. The structure of data acquisition systems is reviewed, and its basic elements of digitizers, host computers, data buses and networks, and data mass-storages are discussed in relation with the recent technological environments, respectively. As the most significant part of the data acquisition, standard data buses for plasma diagnostics, such as GP-IB, VME, and CAMAC, are concretely characterized. Modern examples of data acquisition systems for plasma experiments are also introduced briefly.

#### Keywords:

data acquisition system, ADC, data bus, computer network, distributed processing, data mass-storage, VME, CAMAC

#### 2.1 はじめに

プラズマ実験におけるデータ収集あるいはデータ収集系 (Data Acquisition System, DAS) の果たす役割には大別して二つの側面がある。

一つは、プラズマを生成、制御するため電源を含めた各種制御装置の状態を監視し、得られた結果を帰還制御や保護インターロック等の機器制御に利用する場合がある。また、プラズマ自身の平衡条件を満足させたりプラズマの持つ各種不安定性の成長を抑えるなど、プラズマを持続させるために必要なプラズマ状態を監視し、それによりプラズマ自身の制御を行なう場合もある。こうした場合、データ収集系は制御システムの構成部分として対象であるプラズマあるいは機器制御に必要な時間内の動作を順次要求されるため、基本的に実時間処理が必要

になるという特徴をもつ。

もう一つの側面は、プラズマを物理計測の対象として捉え、プラズマの各種物理量を測定、数値化することでプラズマの物理的描像を把握するための好適な手段を提供、実施するという面である。この場合は、計測システムとして対象となるプラズマ物理がもつ特徴的時間/空間的長さに対して十分詳細なデータを収集することが優先されるため、より計測対象に特化された収集装置が用いられ、実験中はデータ生成に専念し、終了後一括処理するという動作になることが多い。

今日の高度技術化によって、制御あるいは計測システムの各構成要素は各々飛躍的に技術向上を果たしており、データ収集系もまたそれらと歩調を合わせて向上することが要求されている。このためデータ収集系には、

いわゆる実験室の自動化すなわちラボラトリ・オートメーション(LA)の方法を提供する, という狭義の解釈から離れ, 学際的計測工学あるいは制御工学の対象として, 自立した進化が今後ますます求められてくると思われる[1].

以上のような背景から本稿では, プラズマ実験を制御システムあるいは計測システムの適用分野の一つとしてとりあげ, データ収集系を計測/制御システムを構成する工学的要素の集合体と位置づけて, 基本的な各構成要素の解説やシステムとしての特徴, 関連する技術的環境などについての記述を試みる. まず最初に, データ収集系の基本構成をなす各要素を, 主たる利用機器に応じて分類し機能及び関連状況の説明を行う. 次に, データ収集系の要素間を連結するデータ伝送路としてバスをとり上げ, プラズマ実験の計測用バスという視点から統括的に述べたあと, 最後に, 現在プラズマ実験において利用されているデータ収集系の各形態を簡単に列記して紹介する.

## 2.2 データ収集系の基本構成とその現状

計測工学とは, 「対象より計測量を検出・伝送・分析・処理・判断を行うための系の構成, 系の制御, ならびに個々の構成要素に関する工学」[2]と定義されており, 計測システムの構成要素を大別すると,

1. (計測対象)
2. 検出
3. 変換
4. 分析
5. 処理・判断
6. 収録
7. 伝送
8. (機器) 制御

のようになる. 計測工学の中のデータ収集の分野が対象とするのは, この中でも, 変換, 処理・判断, 収録, および各構成要素間の伝送, の各分野と, 系全体の構成および制御である. 機器制御に関しては, 制御工学に依存するところが多く, 通常, 計測工学とは分けて体系化されており, データ処理の興味の対象から外れるので, 本稿では詳説を避ける.

ここでは, データ収集分野の対象である, 計測システムの各構成要素の役割とその内容, プラズマ実験におけるデータ収集系での特徴を, 最近の計測システムを取り巻く状況と共に以下に述べる. 話を具体的にするため, 処理・分析を行なう計算機, 収録を行なうデータ保存装

置, 等と利用機器毎に分類している.

### 2.2.1 アナログーデジタル信号変換

物理計測において検出される物理量は, 通常, 連続的な数値をとるアナログ信号であるが, アナログ信号は伝送に伴って伝送路の精度による影響を受け, 信号の忠実度が悪化する. こうした測定信号の劣化を無くす伝送方法が, 離散値を用いるデジタル信号伝送であり, 検出器から出たアナログ信号をデジタル伝送可能なデジタル信号に変換するのが, アナログーデジタル信号変換部, 通称 ADC (Analog-to-Digital Converter) の基本的役割である.

ADCの基本性能は, 分解能とサンプリング速度, およびその確度であるが, アナログーデジタル信号変換時には連続的な数値を最寄りの離散値に置き換えるデジタル化誤差が必ず伴う. 例えば, 10bit 分解能, 1MHz サンプリングの ADC でデジタル化する場合には, 測定値で  $2^{-10} \cong 0.1\%$ , 時間で  $10^{-6}\text{s} = 1\mu\text{s}$  の誤差が含まれる. 通常の ADC ではこの値はそれぞれのデジタル化確度より大きいので, デジタル化誤差がほぼ ADC の精度と考えてよい.

現在市販されプラズマ実験で用いられる汎用の ADC モジュールでは, 分解能は 10, 12, 16bit 等が一般的であり, 精度としては 0.1% 以下になる. 物理計測の検出部や前置増幅器に用いられる電子/電気回路の精度を 1% 以下にすることの難しさを考慮すると, 高分解能 ADC の利用はデータの信頼性を確保するためには必要ない場合もある.

プラズマ実験で良く使われる ADC の動作としては, プラズマ実験そのものの特徴,

1. 予めプログラムされたシーケンスに沿って, 実験の全行程が進行する
2. 実験開始イベントが自然現象ではないため, オペレーションによって任意の時刻に実験開始を設定できる
3. 実験の繰り返し頻度が低く, かつ, 実験継続時間が物理計測の対象となるプラズマの特徴的時間に対して十分長い

によって, 実験開始トリガで A-D 変換を開始しモジュール内の十分大きなローカル・メモリにデータを蓄積, 実験終了後, データを外部に転送という手順を踏む. このため, ADC 利用の特徴として,

- ・ポスト・トリガ・サンプリング
- ・チャンネルあたり~数百 kword の大容量メモリ
- ・ADC からの処理要求は, 1 シーケンスで実験終了

### 時の1回のみ

をもっており、さらに、A-D変換終了時間が予想可能であることを考えると、ADCからデータ収集計算機への処理要求を待つことなく、終了時刻に計算機側から自動的にデータ収集を開始することも可能となる。

プラズマ実験が予めプログラムされた実験シーケンスであることが、自然現象を観測する物理計測と異なる大きな特色となっている。

### 2.2.2 収集計算機

核崩壊や宇宙線観測のような自然現象を観測する物理計測では、実験開始イベントが能動的に制御できず、常時イベント待ち状態であることが必要となる。また、加速器物理の計測では実験開始イベントの周期が短く、イベントの実時間処理が要求される場合が多い。これに対してプラズマ実験では、通常、こうした実験開始/終了イベントを含めたADCからの割込み処理要求が頻繁に起こることはなく、また、ADCからデータ変換終了が割込通知されても、それを規定時間内に処理して速やかに再びイベント待ち状態に復帰することが要求される訳でもない。

プラズマ実験で使用されるデータ収集計算機は、こうした利用条件のため、割込み処理能力が必要とされることはほとんどないが、反面、実験終了後に大容量の収集データが同時的に一括して伝送され処理されなければならないので、一括処理時のデータ入出力および演算性能が高いことが重要となる。幸いなことに、通称パソコンと呼ばれる小型計算機(PC)やエンジニアリング・ワークステーション(EWS)等における昨今の記憶容量、入出力および演算性能の驚異的向上は、こうしたバッチ処理性能の要求を十分に満たすまでになっており、可搬性がよくかつ廉価なPCによる収集計算機を実現する環境が整えられている。

以上は、プラズマ実験で最も一般的と思われるパルス運転についての考察であるが、超伝導電磁石を用いた定常的長時間放電実験では、所謂実験終了後のバッチ処理だけでなく、実験中の実時間監視も必要になってくる。この場合も、自然現象観測とは異なり、処理間隔は自動的に決定することが可能であるが、機器制御システムの場合と同様、実時間に則して処理イベントを順次完了していく性能が問われる。実時間処理が通例である機器制御システムでは、FA(Factory Automation)やLAのための計算機として、VME等の利用が多く、オペレーティング・システム(OS)もOS-9, pSOS, VxWorks, VMEExec, VRTX等のリアルタイムOSが用いられる。

このバッチ処理と実時間処理との二つの動作形態を大形汎用機などで集中して行くと、大容量の一括データ処理と実時間の割込み処理との相反する二つの計算機性能が要求されるため、システムが複雑化し価格性能比が悪化することが容易に予想される。広範に普及し、かつ高性能低価格化したPC技術を十分に活用するためには、一括データ処理を行ういわゆるデータ収集処理計算機と、実時間監視および機器制御を行う実時間処理計算機とを分離して、分散処理を行うことが、今日最も有効になりつつある選択肢といえるであろう。

### 2.2.3 データ伝送路

計算機環境の高性能化にともない、計算機内部および周辺機器とのデータ伝送路も機能分化が進行し、データが経由される伝送路の数、種類とも増加する一方である。

PCが16bit CPUの当初には、CPU, RAMメモリ、拡張スロットが同じバスを共有し同一のシステムクロックで動作していたため、拡張スロットにADCボードを挿してデータ収集を行うと、まさしく単一の伝送路で事が足りていた。これに較べて現在のPC等では、メモリバス1、拡張バス複数、I/Oバス複数の構成が普及しており、なお盛んに機能改良が行われている。

データ収集と処理/表示とが分離する分散データ処理環境においては、EWSやPCの低価格、高性能化によるクライアント-サーバ(C-S)モデルを用いた負荷分散と相まって、収集データの通過伝送路が十種以上になる場合も珍しくない。こうしたデータ伝送路を大別すると、

1. 結合が密で、複数信号線をパラレルに使って転送速度が大きい、短距離間の伝送であるバス
2. 転送速度が若干劣るが長距離の伝送が可能で、かつ信号線を不特定多数の間で共有して、疎結合な対話的通信を行うネットワーク

に機能的側面から分けることができる。

特に、計測システムの構成要素間を連結するバスは、データ収集システム全体の総合性能に対する寄与が極めて大きく、また、物理実験/プラズマ実験の計測分野で特に利用が多いバスもある事等から、計測用バスという観点で2.3節で改めて解説する。

データ伝送路としてのネットワークは、ダウンサイジング/分散処理への潮流とLAN技術の普及に伴って、急速にその役割を増してきた。ネットワークとは、インテリジェントでかつお互いに対等な不特定多数の計算機間の通信手段を提供する機構で、LANとしては、FA制御関係では回線制御にトークン・パッシングを用いるARCNET等も一部使われているが、CSMA/CDを採用

した通信帯域幅 10Mbps の Ethernet が現在の主流である。また、速度的改善を目指した帯域幅 100Mbps の Fast Ethernet, FDDI [3]や、回線交換技術を応用した ATM 等の利用も進められている[4]。こうした LAN の相互接続手段として、通信手順的に遠隔地間通信が可能なインターネットが普及したことにより、機器制御や収集データの実時間表示を行うクライアント計算機を遠隔地で利用することが実現しつつあり、プラズマ実験の分野でも遠隔実験のためのネットワーク構築の取り組みが行われ始めている[5]。

このように、高速ネットワークをデータ伝送路として計測システムへ導入することによって、一部を除いてデータ収集系の構成要素間の物理的接続距離に関する制約は事実上取り払われたといえ、今後のプラズマ実験の新たな形態を産み出すものと期待される。

#### 2.2.4 データ保存装置

計測によって得られた実験データの格納場所であり、計測技術の進歩に伴って大容量化の一途をたどっている計測データを充分格納できると共に、実験後のデータ参照を円滑に行えることが要求される。しかし、通常流通している記憶媒体においては、大容量性と高アクセス性との二つの性能は一般的に背反してしまうため、

1. 高速でかつアクセス性の良い短期保存装置
2. 比較的低速でアクセス性が劣るが大容量を実現できる長期(半永久)保存装置

に機能を分化して、データ保存装置を構成することが多い。現在流通しているデータ保存媒体を挙げると、紙、磁気テープ(MT)、磁気ディスク(HD)、光磁気ディスク(MO)、光ディスク、等があるが、紙(連続紙)に関しては、ペンレコーダ等の低速監視装置での用途のみで、データの保存に使われることは現在ではほとんどない。

短期保存装置としては、一時期、磁気テープによる大容量データ・レコーダがプラズマ実験に用いられたこともあったが[6]、現在ではほとんど通称ハードディスクといわれる磁気ディスク装置が使われ、ある程度(～GB)の容量があり高速かつランダム・アクセス可能な装置として代替する媒体は現れていない。また信頼性や MTBF 時間を向上させるための RAID と呼ばれるディスク・アレイ機構も普及している。

長期保存装置は、テープ等のシーケンシャル・メディアとランダム・アクセス可能メディアとに別れるが、共に日進月歩の技術革新で大容量化されている。保存媒体からの自動読み出しを検討する場合、自動媒体交換機構が必要になるが、MT カートリッジや MO, CD-ROM 用

の物が既に一般に流通している。一媒体あたりの記憶容量、単位容量あたりの価格、媒体交換機の普及度を考慮すると、プラズマ実験装置の長期データ保存機構としては、大型装置では DLT, DVD, 中小型装置では CD-R 等が有望視される。

近年のキャッシュ技術の進歩によって、個々の記憶装置は、既にほとんど半導体記憶によるローカル・キャッシュを備えて入出力の高速化を図っているが、短期および長期保存装置は、現在まで明確に区別して利用されてきており、収集データは半自動あるいは手動によって定期的に移しかえ作業が行われてきた。プラズマ実験の過去データに対する参照は、いわゆる「グッド・ショット」に比較的集中する傾向があり、長期保存装置に格納された過去データの参照をハードディスクによりキャッシュする手法が確立すれば、実質的に極めて良好なアクセス性が実現できる可能性が高い。

#### 2.3 計測用バス

計算機システムの性能では、演算処理ユニット(CPU)の性能もさることながら、全てのデータの伝送路であるバスの転送性能が、大量のデータを取り扱うほど重要となってくる。また、データ収集系において ADC などによってデジタル化されたデータは、最終的な格納場所に至るまでの間に、複数の種類のデータ伝送路を経由して転送されるのが一般的である。

プラズマ実験におけるデータ収集では、複数の計測機器から大量のデータがほとんど同じ時間帯に集中して伝送、処理されるので、データ伝送性能の優劣がデータ処理のスループットを大きく左右することになる。このため、プラズマ実験のデータ収集系におけるデータ伝送路としては、より多くの複数信号線を複数の機器が共用することで、個々のデータ伝送にかかる時間の短縮化を図る場合が多い。この様に双方向通信が可能で、機器間で共用されたパラレル伝送線を一般をバスと呼んでいる[7]。

バスの信号線の本数は、通常ビット(bit)を単位として数えられ、1本の信号線が1ビットのデータを伝送するので、8本のデータ伝送線を持つバスは、8ビット幅をもつ。よく知られている通り、通常のデータ・バス幅は8ビット=1バイト(byte)の倍数をとる。

バスの標準化は、IEC(International Electrotechnical Commission)やIEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)によって行われており、例えば、IEEEによって規格化された標準には、IEEE Std.の番号が割り与えられる。ここで、一般に良く使われるバスの種類

を利用形態の面から分類してみると、ほぼ以下の通りとなる。

#### 内部バス

コンピュータの主基板（マザー・ボード）内で使われるローカル・バス。利用するCPUのアドレス線、データ線に直結して使われるためCPUに依存する。主記憶DRAMへの接続に通常使われるのでメモリ・バスとも呼ぶ。i486のVL-BusやMacintoshの各PDS等も該当する。

#### 拡張バス

主基板上に拡張スロット・コネクタとして実装され、主に、各種拡張I/O用コントローラ・カードの接続に用いられる。一般に、内部バスとはブリッジとよばれるバス変換器を通して間接的に接続されるため、独自のバス・クロックが使用される。代表的なものに、ISA, EISA, MCA (以上PC), C, NESA (98), NuBus (Macintosh), SBus (SPARC), PCI, PCMCIA等がある。

#### I/Oバス

周辺機器接続の入出力インタフェースとして使われるバス。SCSIやGP-IB, セントロニクス・インタフェース等。

#### システム・バス

CPUモジュールを含む任意の用途をもった複数のモジュール（ボード）をプラグイン形式で収納して、モジュール間のバス接続を提供する。互換性のために標準化されたものを特に、「標準バス」とも呼ぶ[8]。例としては、VME, VXI等がある。

#### 計測バス

複数の計測モジュールを収納しデータ伝送路を提供する面ではシステム・バスに類似するが、アドレスをスロット番地に（半）固定として簡略化する等、データ・バスを強調した仕様をもつ。CAMAC, FASTBUS等が有名。

データ伝送路としては、上記の他に、EIA (Electronic Industry Association) 標準のRS-232-C (EIA-232-E) 等といったシリアル接続が、機器—計算機間の通信によく用いられる。特にRS-232-Cは、計算機に標準ポートとして装備されていることや、通信用IC、ケーブル類が一般に安価で普及していることなどから、広範な用途で利用されている。しかし、データ収集系における伝送路として、大量のデータを高速に転送することを要求される様な場合、例えば普及しているRS-232-Cでは最大転送速度が20kbpsと速度的に性能不足であることから、

実質的にデータ伝送路にシリアル接続が使われることは少ない。

以下では、実際に計測機器によく使われる各種バスの特徴などについて取り上げる。シリアル接続の詳細に関しては、他のテキストを参照されたい。

#### 2.3.1 GP-IB

General Purpose Interface Busの略で、米ヒューレット・パッカート社が開発したHP-IBがIEEE Std. 488-1978, IEC-625で規格化されたものである。今日のいわば計測用インタフェース・バスの標準的存在となっている。

バスの信号線構成は、データ・バス8本、ハンドシェイク・バス3本、管理バス5本と接地線8本よりなり、3線式ハンドシェイクの機構を採用することによって3台以上のバス接続機器間の安定した通信を可能にしている[9]。この3線式ハンドシェイクは、通信相手側の対応を待つて次の手続きを行うという手順を常にとるため、異なる最大通信速度を持つ異機種間通信においても確実に通信が行えるという特徴があるが、逆に各機器のうちに最も通信速度の遅い機器の対応可能な速度でしか通信が行われれないという速度的欠点を併せ持つ。このため、GP-IBの最大転送速度は規格的には1MB/sあるところを、通常の異機種接続においては実効的に数十kB/s程度しか出せない場合も多い。

同じI/Oバスのセントロニクス・インタフェースやPC/AT互換機の平行ポートも同様の3線式ハンドシェイクの信号線を持っているが[7,10]、通常、ほとんどプリンタを対象にした対向接続であるため、実質的には2線式ハンドシェイクで使われる。

GP-IBの利用形態としては、0~31のアドレス番号を機器に固定的に設定し、最大15台の機器を総長20m以

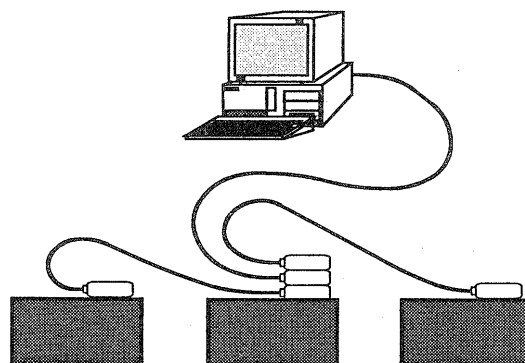


Fig. 1 Typical GPIB connection between the controller and equipments

内で接続して利用できる。また、バスに接続される機器の基本構成は、

1. バス上にコントローラが1台と各1台以上のトーカー、リスナが存在する
2. バス上にトーカーが1台と少なくとも1台のリスナが存在する

の2通りがありえる。GP-IBでは、データ/コマンドの送信者をトーカー (Talker)、受信者をリスナ (Listener) と呼び、前者の場合コントローラが動的に、後者の場合固定的に特定の機器に割り当てられる。コントローラが介在しない後者の形態は、入出力が固定された限定的な使用方法であり、計算機が介在するデータ収集、制御系統等では通常前者の形態が用いられ、計算機に接続された GP-IB インタフェースがコントローラになる場合がほとんどである。

GP-IB 機器側からの割り込み処理要求は、管理バスのうちの1本である SRQ (Service Request) 信号線を用いてコントローラに対して行われる。SRQ 線がアクティブであることを検知したコントローラは、処理要求を出している機器をポーリング (点呼) によって特定する。ポーリングの種類には、

**パラレルポール** 8本のデータ・バスを8台の機器に割り当て同時に要求の有無を判定する

**シリアル・ポール** 機器を1台ずつ呼出し、その機器の状態を示すステータス・バイトを得ることで要求の有無を検査していく

の2種類があるが、パラレル・ポールには対応していないコントローラも多く、通常シリアル・ポールが良く使われる。

GP-IB で接続される機器としては、標準的 I/O バスであることから一般に入出力装置が多く、具体的には、デジタル・マルチメータや各種ゲージ・コントローラ、X-Y プロッタなど比較的低速でデータ量の少ないものが対象となっている。また、光エクステンダーで容易に電氣的絶縁をとり延長できるので、小規模のシステム構築時に利用されることが多い。

### 2.3.2 VMEバス

VME (Versa Module Europa) バスは、モトローラ社が MC68000 CPU のために開発した Versa バスを、ユーロ・カードのサイズでの標準として1981年にまとめられたもので、IEEE Std. 1014-1987、および IEC 821 として規格化されている。その本来が、68000CPU 用システム・バスとして設計されたこともあり、当初よりデータ・バス、アドレス・バスが共に最大 32bit 幅をもっている。

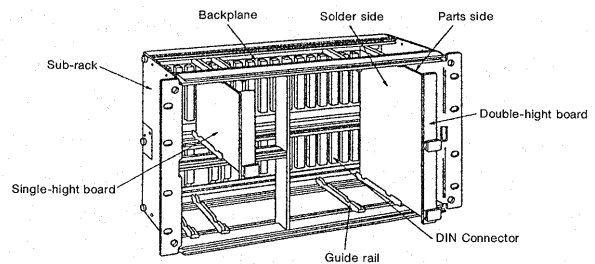


Fig. 2 Schematic view of VMEbus system

また、バス幅を広く必要としないボードでも、データ・バスでは 8, 16, 32, アドレス・バスでは 16, 24, 32bit 幅をボード毎に指定して、上位ビットをデコードしないことで、他のボードと同時に利用することができる仕様になっている。

さらに、VMEバス上の I/O 用ポート・アドレスが、メモリ空間上の特定のアドレスに直接マップされるメモリ・マップト I/O が採用されており、アドレス空間を線形で画一的に取り扱うことが可能なため、システム・プログラミングが平易に行えるという長所がある。

このように極めて汎用的な仕様を持っているため、VMEバスは計測モジュールのためのプラグイン・バスというよりも、むしろ、汎用バスの色彩が強く、歴史的にも EWS のシステム/拡張バスとして一般的に使用され普及してきた経緯をもっている。例をあげると、EWS のトップメーカーである Sun においても 68010CPU を使用した Sun2/160 (1985年) から、SPARCstation における SBus の採用以降も暫くデスクサイド機の標準バスとして使用された[11]。

バスの特徴としては、

- ・アドレス・バス 16, 24, 32 ビット
- ・データ・バス 8, 16, 32 ビット, big-endian
- ・アックノリッジ (Acknowledge) 型ハンドシェイクによる非同期転送
- ・理論最大速度 57.2MB/s, バス・クロック 16MHz
- ・複数のバス・マスタの共存が可能
- ・1つのバス・アービタによる使用権の集中調停 (Arbitration)
- ・7レベルの割り込み要求/処理
- ・サブバスによる拡張性

等をもち、構造的特徴としては、

- ・最大 21スロットのバックプレーン
- ・シングルハイト (3U) とダブルハイト (6U) のポー

## ド・サイズ

## ・96ピンDINコネクタの採用

があげられる。バス転送形態は、マスタースレーブ間のハンドシェイクによる非同期転送であり、実効的な転送速度は理論最大速度の半分程度以下と考えるとよい。

VMEのサブバスは、ダブルハイト・ボードのP2コネクタ側の空き64ピンをユーザ定義として利用したもので、パラレル接続ではI/Oチャンネル、VSB (VME Subsystem bus), VMX (VME Memory Extension bus), シリアルではVMS (VME Serial bus)がある。それぞれVMEバスと併行して対応するボード間での通信に用いられる。

VMEバスは、供給されるボードの市場流通量の多さからみても正にFAやLAにおける実質的標準といえ、その応用分野は、リアルタイム計測制御から大容量画像データ処理に至るまで極めて多岐にわたっている。しかし、耐実験室環境という側面から見た場合、静電、電磁ノイズに対する耐性や、光ファイバによる電氣的絶縁が確保できるような仕様を持つ訳ではなく、この点で、通常かなり強いノイズ発生を伴うプラズマ実験においては、後に述べる計測バスに本流を譲っている。

## 2.3.3 VXIバス

VXI (VMEbus eXtension for Instrumentation) バスは、文字通りVMEバスをモジュラー型計測器のために機能拡張したもので、米空軍のモジュラー型自動検査装置 (ATE: Automatic Test Equipment) 計画の成果として1987年に世に出た。計測機器をモジュラー化してインタフェースを標準化することで、個々の計測器間の連携を高め、高収納密度化、高機能化を図っており、IEEE Std. 1155を受けている。

基本的にVMEバスと上位互換性を保持し、データ転送にはVMEと同じP1, P2コネクタのA32, D32までの信号線を利用する。ボード・サイズも、VMEバス互換のA-サイズ (3U), B-サイズ (6U) と、奥行きを2倍強の340mmに拡張したC-サイズ (高さ6U相当), D-サイズ (高さ9U相当) の4サイズを持っている[12]。

VMEバスからの電氣的仕様の拡張としては、P2コネクタの未使用ピンを用いて、ECLレベルの10MHzシステム・クロックと12bitローカル・バス、新たにTTL, ECL両レベルのトリガ線を提供しているほか、D-サイズ・ボードでは、P3コネクタにて100MHzクロックと24bitローカル・バス (計36bit)、4本のECLトリガ線を規定し、モジュラー型計測器バスとしての総合的利用性向上を可能にしている[13, 14]。

VXIバスの利用構成としては、現在以下の3つの方法が標準的になっている[14-16]。

**コントローラ (CPU) 組み込み型** 最もVMEバスの利用形態に近く、バス・コントローラとしてVXIモジュール型計算機をスロット0に挿して利用する。VXIシステムとして最も高速な処理が可能となるが、反面、外部とは全てCPUとの通信を経由するため、通信手順を用意する等利用方法が複雑化する。

**GP-IB インタフェース型** GP-IBインタフェースを持ったVXIコントローラを用いてGP-IB経由でバスと接続機器を制御する。GP-IBの転送速度がVXIに較べ低速なので、大量データ転送には速度的に不利となる。

**MXI インタフェース型** 低速なGP-IBの代わりに、MXIbus (Multisystem eXtension Interface bus) インタフェースを持ったVXIコントローラに対して、同じくMXIインタフェースを持った外部計算機から制御を行う。利用形態はGP-IBとほぼ同様になるが、速度的に大きく (最大20MB/s) 改善される。

VXI, MXIはバス規格そのものが他の計測器関連バスと較べて新しいこともあり、特に、他の装置やバスとの取り合いのための周辺機器、VXIを利用するためのプログラム開発環境、ライブラリやドライバといったミドルウェアの提供、蓄積が少ない。そのため、小規模システム用の市販ソフトウェアはあるものの、中規模以上のプラズマ実験のためのデータ収集装置としては、光ファイバによる電氣的絶縁の確保や遠隔制御を行うためのサポート・ソフトウェアなどの点で未だ充実度が低いと言わざるをえない。今後の展開が期待される。

## 2.3.4 CAMAC

CAMACはComputer Automated Measurement and Controlの略で、プラズマ実験のみならず、加速器/素粒子物理実験を含めた高エネルギー物理実験におけるデータ収集系の主流である。その歴史は古く、既に1970年にCAMACモジュール製品が発売を開始されている[17, 18]。

多くの機能的追加を重ねながらも、今日まで実験室環境における事実上の標準の地位を守っている理由としては、

- ・計算機の仕様に全く依存しない完全に独立した規格である
- ・作動プログラムを要しないコマンド動作型の周辺機器である
- ・N, A, Fと呼ばれる制御コマンドが極めて単純でかつ体系化されている

Table 1. CAMAC standards

| Classification                  | IEEE Std. | IEC      |
|---------------------------------|-----------|----------|
| Instrumentation and Interface   | 583-1982  | 482, 516 |
| Serial Highway                  | 595-1982  | 640      |
| Parallel Highway                | 596-1982  | 552      |
| Multiple Controllers in a Crate | 675-1982  | 729      |
| Block Transfers                 | 683-1976  | 677      |
| Real-Time BASIC Language        | 726-1982  | 45       |
| CAMAC Library Subroutines       | 758-1979  | 713      |

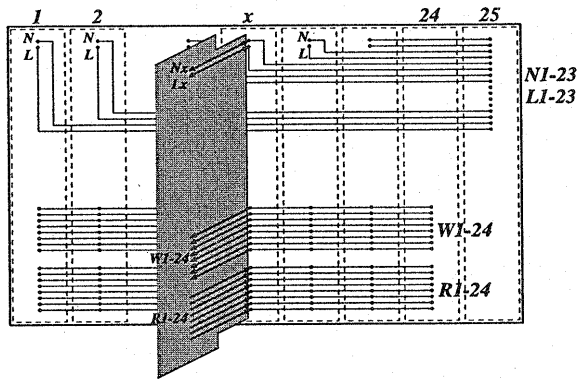


Fig. 3 CAMAC dataway and module layout

等と考えられる。CAMAC 規格としては、IEEE Std. 583-1982, IEC 482, 516 が基本規格であるが[19], 機能的追加を反映して関連の規格も多い。Table 1 に CAMAC の関連規格をあげる。

CAMAC は、計測バスの特徴として、他のバスとは異なるユニークな機能と名称を持っている場合が多い。例をあげると、

**データウェイ** CAMAC の信号線の総称であるが、他のバスと異なりアドレス線が平行に配線されおらず、コントローラと一対一で各スロットに対して直接結線されている。これらはステーション番号線 (N1 ~ N24) といわれ、このためバス結線は、ほぼ制御線とデータ線のみになるため、この名称がある。VME, FASTBUS 等ではバックプレーンと呼ばれる。

**クレート** モジュールのための支持構造および電源、冷却機構を提供するいわば“箱”を示す用語で、CAMAC と FASTBUS でのみ使用される。サブラック (VME), メインフレーム (VXI) に相当する。

**ハイウェイ** クレートと CAMAC を制御する計算機とを遠隔で接続するための伝送路。規格としては、66 対ケーブルで接続する平行・ブランチ・ハイウ

エイと、光ファイバでリング状に接続するシリアル・ハイウェイとがある。制御は、ブランチ・ドライバあるいはシリアル・ドライバと呼ばれる計算機に接続されたコントローラから画一的に行われる。等が代表的なものである。このように、CAMAC のデータ伝送路は、データウェイ、ハイウェイとも“シングル・マスター・マルチ・スレーブ”の設計思想で統一されており、その実装が、ハードウェア的な結線によって固定化されている。このため柔軟な応用ができない反面、簡潔な構成になり特にバス制御が単純化され簡便に利用できるという長所を併せ持つ。

その他の実装上の特徴としては、

- 単方向のデータ・バス：Read 24bit, Write 24bit
- 最終スロットに位置が固定された単一のクレート・コントローラ
- N 線と同様にコントローラと対向結線された割り込み要求 (Look-at-Me) 線 L1 ~ L24
- Q-response 信号を制御に用いるブロック転送
- “CAMAC サイクル”と呼ばれる  $1\mu\text{s}$  中に固定されたバス・タイミング
- カードエッジ・コネクタ
- LEMO といわれる小型同軸コネクタをアナログ信号に利用

等であり、最大 1Mword/s (1word = 16 or 24bit) のデータ転送能力をもつ。このデータ転送速度とカードエッジ・コネクタの信頼性の問題が、後発のバスと較べた場合の短所と言える。

CAMAC データウェイの制御は、通常 N, A, F と呼ばれる CAMAC コマンドで完結している。N, A, F はその名前の通りデータウェイのステーション番号線  $N_x$  ( $x$  は 1 ~ 24 の内の 1 つ), サブアドレス番号線 A1, A2, A4, A8, ファンクション番号線 F1, F2, F4, F8, F16 の各信号線出力を指示し、N, A で選択されたあるモジュールのチャンネルに対して F のファンクションを実行させるというものである。F(0) ~ F(31) の意味は、例えば F(8) は Test Look-at-Me というようにほぼ固定されている。

近年発表されるバスは、高速化、高機能化の一途をたどっているが、複雑さをも同時に増している。プラズマ実験のデータ収集の様な、ある程度頻繁に利用形態や設定が変更される実験室環境での利用の際、理解しやすく直観的に利用できるという観点で CAMAC はなお十分にその要求を満たしており、現在も実質的に代替するバスがない存在となっている。

### 2.3.5 FASTBUS

32bit 幅のアドレス/データ共用信号線をもったバスで、通常のバスの TTL と異なりアドレス/データ線に全て ECL を採用することで、データ転送の高速化を図っている。IEEE Std. 960-1986 規格書では、+5V, -5.2V, -2V バス線にそれぞれ 300, 300, 200A の電流転送能力を推奨していることからわかるとおり、通常クレート電源が大型化するとともに、空冷または水冷の強制冷却機構の使用が必要になる[20]。

FASTBUS クレートのバックプレーンには、セグメントと呼ばれるデータ・制御信号線のバスと、アナログ信号やトリガのための補助バックプレーンとがあり[18]、セグメントは、SI (Segment Interconnect) とケーブル・セグメントと呼ばれる接続用ケーブルとによる相互接続で拡張可能であり、同一のアドレス空間を共有する。アドレス空間が 32bit 幅あることから、実質的に拡張性の制限はなく、また、全てのアドレスが対等であるため、バス・コントローラの挿入位置も任意である。

FASTBUS の機能的特徴としては、データ転送時のみハンドシェイク転送と非ハンドシェイク転送 (パイプライン転送) が選択可能である点と、さらにアドレッシング機構が、

1. Geographical セグメントとスロット位置番号
2. Logical 32bit アドレスを利用した論理番地参照型
3. Broadcast 複数のスレーブに同時参照

と自由度が大きい点などである。また、アドレス線とデータ線が共用であることから、

1. アービトレーション・サイクル
2. アドレス・サイクル
3. データ・サイクル

の順で FASTBUS のシーケンスは実行され、アドレス・サイクルでスレーブがマスタに接続されることでデータ転送相手が指定される。

プラズマ実験における計測用バスとしての位置づけおよび利用法は、ほぼ CAMAC の高速版というところであるが、CAMAC に比較してより自由度と拡張性が大きい反面、利用方法が複雑化する欠点を併せ持つ。

## 2.4 各データ収集系の比較

本節では、現在プラズマ実験にて実際に用いられているデータ収集システム各系を簡単に紹介し、その特徴などを述べる。実際の応用としては、本講座の第4章にて詳しく具体的事例が解説されるので、そちらの方も参照

して頂きたい。

### 2.4.1 小規模システム—その1. PC/EWS の拡張バス・ボードによる直接収集

PC の拡張スロットに直接 ADC ボードなどを挿してデータ収集を行うもので、収集できるデータのチャンネル数は少ない。また、ノート型 PC の拡張バスである PCMCIA では、ボード・サイズの的に実装が困難なので、基本的にデスクトップ機以上の計算機に限られる。安価に独立したデータ収集系が組めるという特徴がある。

### 2.4.2 小規模システム—その2. PC/EWS と SCSI/GP-IB 接続の利用

データ収集にある程度のチャンネル数が必要な場合や、既存の ADC モジュールなどの計測器を使用したい場合、あるいは現地調整時などに良く利用される方法である。一台あるいは数台までの CAMAC, VXI といった計測バスや単独の計測機器を、PC の拡張スロットに挿した SCSI, GP-IB 等の I/O バス・コントローラ経由で制御する方法で、PC 側はコントローラ・カードのみで済むので、ノート型 PC でも構築が可能であるなど、可搬性が高い。

LabVIEW 等の機器制御、データ収集/表示が一体となったソフトウェアが良く利用され、簡便に制御、収集が行えるが、対応機器が限定されたり遠隔で利用できないなどの制限はある。

### 2.4.3 中規模システム—その1. EWS と CAMAC ハイウェイの利用

ここ数年来急速に普及した EWS をデータ収集計算機として利用し、それまで中規模システムで主流だった専用ミニコンの交替を行う際によく採られるシステム構成の一つである。CAMAC とそのハイウェイ構成はそのままで、収集計算機に接続するハイウェイ・ドライバのみを EWS の拡張バスあるいはシステム・バスに接続し置換することで交替が出来るので、従来構成を最小限の変更で利用できる長所があるが、最大の難点は、CAMAC ハイウェイ・ドライバが高額である点である。

具体的事例としては、次節に述べるパラレル接続用 CAMAC ドライバ・ソフトウェアをもとに、日本原子力研究所 (JAERI) の青柳哲雄氏によって Sun SPARCstation 上から VME バス用シリアル・ハイウェイ・ドライバを制御してデータ収集が行えるよう改良が加えられたものがあり、JT-60 や TST (東大理) 等で利用されている[21]。

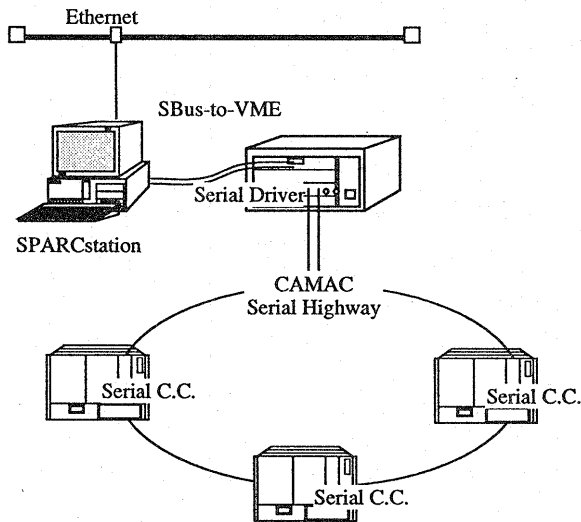


Fig. 4 Schematic view of CAMAC serial highway controlled by the VMEbus serial driver

#### 2.4.4 中規模システム—その2. EWS とパラレル接続の利用

前項の CAMAC シリアル・ドライバの代わりに、VMEbus 用パラレル・インタフェースとパラレル・クレート・コントローラの対を使用する方法で、SPARCstation でのデータ収集の他に、VMEbus をシステム・バスとして採用しているデスクサイド型 Sun4 や、VME ワンボード型 SPARC 等でも利用可能である [22]. ドライバ・ソフトウェアは、SunOS 上の Sun4/VME の上位ドライバとして東工大の竹内康雄氏が開発され [23], 現在も KEK にて保守されている [24].

EWS の OS が UNIX であり、実時間処理が基本的には出来ないが、利用時教育が容易で学生が馴染みやすい等の理由から特に大学研究室等での利用が多く、ヘリオトロン-E (京大) や REPUTE-1 (東大) [25,26] 等で採用されている。

#### 2.4.5 大規模システム—その1. 汎用機を利用した集中型

データ収集を集中型で行うことの利点は、各計測装置の制御や計測データの収集、保存、管理等を一つのシステムで行えること、および、設備を集中することで最大処理能力が稼げる点である。PC, EWS 等の小型計算機の処理性能が未だ不十分であった環境で、大容量の収集データを扱う十分な処理能力を得るための実効的選択肢であったといえるが、専用の計算機室が必要であるなど設備の維持、保守の面で制約が多い。JT-60 [6] 等の大型装置で使われている。

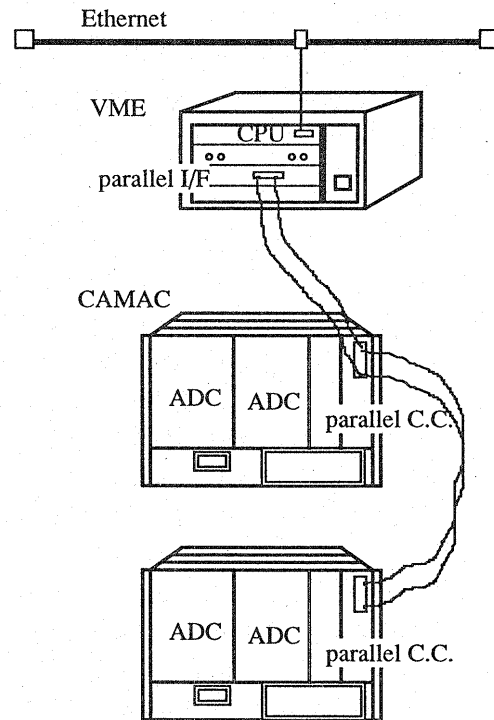


Fig. 5 Simplified diagram of the parallel connection between VME and CAMAC

#### 2.4.6 大規模システム—その2. ミニコンによるグループ型

ミニコンの主力メーカーである DEC 社製の VAX/VMS システムでは、複数台のホスト間でディスク等のリソース共有を行って、共同でデータ収集/処理を実行する“VAX クラスタ”と呼ばれるグループ型データ収集系を組むことができる。ネットワークの通信には、独自の DECnet プロトコルが用いられる。

従来型 UNIX との大きな相違点でもあるが、VMS では制御/モニターなどの実時間処理を行う機能があり、統合的な制御処理システムの構築が可能である。また、ホスト計算機やディスクなどのリソースを増設するだけで大規模システムにも適応できる拡張性を持っている。物理実験で利用されてきた歴史は長く、CAMAC 関連の対応インタフェースやドライバ・ソフトウェアなどが充実している点も重要である。JFT-2M (JAERI) [27] や JIPP T-IIU (NIFS), TFTR (米国 PPPL) 等で採用されている。

#### 2.4.7 大規模システム—その3. PC/EWS ネットワークによる対称分散型

小規模システムのデータ収集構成単位である PC-SCSI-CAMAC の系を計測機器毎に配備し、その間を高速 LAN で結ぶことで、仮想的なデータ収集マクロシ

ンを構成する方式である。

PC 一台からの構成が可能で、拡張性が高いといった特徴をもっており、建設中の LHD (NIFS) 用データ収集系として現在開発が進められている。

## 2.5 おわりに

プラズマ実験のデータ収集を取り巻く環境の、近年における著しい変化としてあげられるのは、計測データの大容量化と PC の高性能、低価格化であろう。計測技術の進歩にともなって CCD に代表される多次元、多チャンネル計測が一般化した結果、計測データへの要求は増加の一途を辿っているが、半導体記憶素子の大容量化がそれを可能にしているのが現状である。また、PC の CPU 演算性能もほぼ記憶素子の容量増加と共に高速化してきた。

こうした半導体技術の向上に対して、データ伝送路として主要な役割を果たすバスの伝送性能は必ずしも同期的に進歩しているわけではなく、検出や変換、処理、収録といったデータ収集システムの各構成要素の性能向上を生かしてデータ収集系の総合性能を上げる際の、より重要な検討項目となりつつある。本稿ではこのような状況を踏まえて、収集データ伝送路としてのバスを、できるだけ統括して解説する取組みを行った。

データ収集系の設計では、バス利用の設計が非常に重要な位置を占めているという点をご理解頂ければ幸いである。

## 2.6 謝辞

本稿をまとめるに際して、快く規格データ等の参考資料提供に応じてくださった核融合科学研究所計測技術課の諸氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 南 茂夫：「科学計測のための波形データ処理」(CQ 出版社，東京，1986)。
- [2] 山口勝美，森 敏彦：「計測工学 (機械システム入門シリーズ 2)」(共立出版，東京，1993)。
- [3] 泉谷建司：「Ethernet と FDDI」(ソフト・リサーチ・センター，東京，1993)。
- [4] 清水 洋，鈴木 洋：「ATM-LAN」(ソフト・リサーチ・センター，東京，1995)。
- [5] <http://www.LHD.nifs.ac.jp/FECnet/>.
- [6] 長島 章，次田友宜他：核融合研究 **59** 303 Supplement.
- [7] 高見 豊：インタフェース No. 8, p. 51 (1995).
- [8] 徳田雅史他：インタフェース No. 4, p. 83 (1993).
- [9] 岡村勉夫：「標準デジタル・バス (IEEE-488) とその応用」(CQ 出版社，東京，1981)。
- [10] トランジスタ技術編集部 (編)：「IBM PC と ISA バスの活用法」別冊トランジスタ技術増刊，(CQ 出版社，東京，1996)。
- [11] 下山智明，城谷洋司：「SUN システム管理」(アスキー，東京，1991)。
- [12] KineticSystems Corporation, *VXIbus Product Catalog* (Illinois, 1995).
- [13] 日本ヒューレット・パカード： *Test & Measurement Catalog* (東京，1996)。
- [14] National Instruments, *Instrumentation Reference and Catalogue* (Texas, 1995).
- [15] ソニー・テクトロニクス：総合カタログ (東京，1996)。
- [16] Tektronix, *VXI Product Catalog* (Colorado, 1994).
- [17] KineticSystems Corporation, *CAMAC Product Catalog* (Illinois, 1993).
- [18] LeCroy, *1994 Research Instrumentation Catalog* (New York, 1994).
- [19] 熊原忠士他：JAERI-M 6003, JAERI (1973).
- [20] IEEE Standards Board, *IEEE Standard FASTBUS Modular High-Speed Data Acquisition and Control System* (John Wiley & Sons, New York, 1984).
- [21] REPUTE Group, *Low Aspect Ratio Tokamak Experiments*, REPUTE-1 Annual Report 1993, Univ. of Tokyo, p. 30 (1994).
- [22] FORCE COMPUTERS, *SPARC CPU-2CE Technical Reference Manual* (1982).
- [23] Y. Takeuchi *et al.*, KEK preprint 92-80, KEK, TIT-HEP-92-05, TITECH (1992).
- [24] <ftp://onlnews.kek.jp/pub/kek/camac/>.
- [25] 中西秀哉他：「光 Ethernet を用いたネットワーク化データ収集システム」プラズマ・核融合学会 第 10 回秋期講演会予稿集，p. 43 (1993).
- [26] REPUTE Group, *Data Acquisition Networking System with Optical Ethernet for REPUTE-1*, REPUTE-1 Annual Report 1992, Univ. of Tokyo, p. 37 (1993).
- [27] T. Matsuda *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66**, 515 (1995).