気球搭載型検出器を用いた
宇宙線観測実験における
環境モニターシステムの開発

神戸大学自然科学研究科物理学専攻
964S120N 村田 孝宏

平成 10 年 2 月 10 日

概 要

物理学実験においては、様々な物理現象に対してより深い研究を進める為、しばしば実験システムに改良が加えられる。また興味の対象が変更され、システム全体を作り変える必要性が出ることも考えられる。

ところが、最近の実験システムは大変複雑なものであり、ハードウエアのみならずソフトウエアにおいてもその理解は容易ではない。そのためシステムの保守や変更に費やされるマンパワーは非常に大きなものとなる。

このように興味の対象であるべき物理現象の研究以外で余計な労力を消費するのは全く無駄なことである。実験システムは研究そのものに対する性能を第一に考えることはもちろんだが、できるだけ柔軟で理解しやすく、さらに過去の資産を流用できるように設計することが重要であるといえる。

本論文は上のような理由から特にシステム変更と保守管理における柔軟性、簡易性に主眼をおいて開発した、ネットワーク型モニターシステムについて述べる。

目 次

第 1 章　序 **2**
1.1 BESS の目的と成果 2
1.1.1 宇宙起源反陽子エネルギースペクトルの測定 2
1.1.2 宇宙線中の反ヘリウムの探索 5
1.2 新型モニターシステムの必要性 5

第 2 章　BESS 測定器 **7**
2.1 検出器 8
2.2 データ収集システム 10
2.2.1 通信サブシステム 11
2.2.2 モニターデータ収集システム 12
2.2.3 イベントデータ収集サブシステム 12
2.2.4 データ蓄積サブシステム 13

第 3 章　環境モニターシステムの開発 **15**
3.1 環境データ収集システム 16
3.1.1 Local Object Network 16
3.1.2 センサーノード 18
3.1.3 環境データ収集システムの Subsystem conductor 21
3.2 地上モニターシステム 23
3.2.1 地上モニターシステムのソフトウェア 24
3.3 動作確認 27

第 4 章　今後のデータ収集システム **29**
4.1 1 バス型システムへの移行 29
4.2 LON による測定器制御 30

第1章　序

超電導スペクトロメーターを用いた気球実験 (BESS) は、我々の研究室が東京大学、高エネルギー加速器研究機構、宇宙科学研究所、ニューメキシコ州立大学、メリーランド大学、NASA と共同して行なっている宇宙線観測実験である。'93 年以降毎年カナダにおいて気球による飛翔実験において各宇宙粒子線を精密に測定して「初期宇宙における素粒子現象」の探索等を行なっている。

1.1　BESS の目的と成果

1.1.1　宇宙起源反陽子エネルギースペクトルの測定

宇宙線中に含まれる反陽子の flux は素粒子物理学、宇宙物理学の研究において、大変興味深い情報を担っている。

一次宇宙線の中に含まれている反陽子は、通常高エネルギー宇宙線と他の星間物質との衝突によって生成されたものと考えられている。このような二次的生成過程においては運動学的な制限により低エネルギー反陽子の生成が著しく抑制される。(図 1.1 実線) [5]

一方 Primordial Black Hole(PBH) の蒸発や、ダークマターの候補の一つとしてあげられている Neutralino が対消滅反応を起こすことによって生成される可能性が指摘されており、このような一次的に生成された反陽子のエネルギースペクトルは低エネルギー領域まで平坦なものとなる。

BESS では世界で初めて質量による同定という確実な方法を用いて宇宙空間での粒子測定を行ない、'93、'94、のフライトのデータからは 0.175 ~ 0.6 GeV の領域に 8 個、(ref ueda) '95 のフライトのデータからは 0.175 ~ 1.4 GeV の領域に 43 個 (refmatunaga)(図 1.2) の反陽子を検出し、宇宙線中の反陽子の存在を確立した。

しかし現在の統計量では十分ではないため、今後も低エネルギー領域における精密な反陽子スペクトルの測定が望まれている。

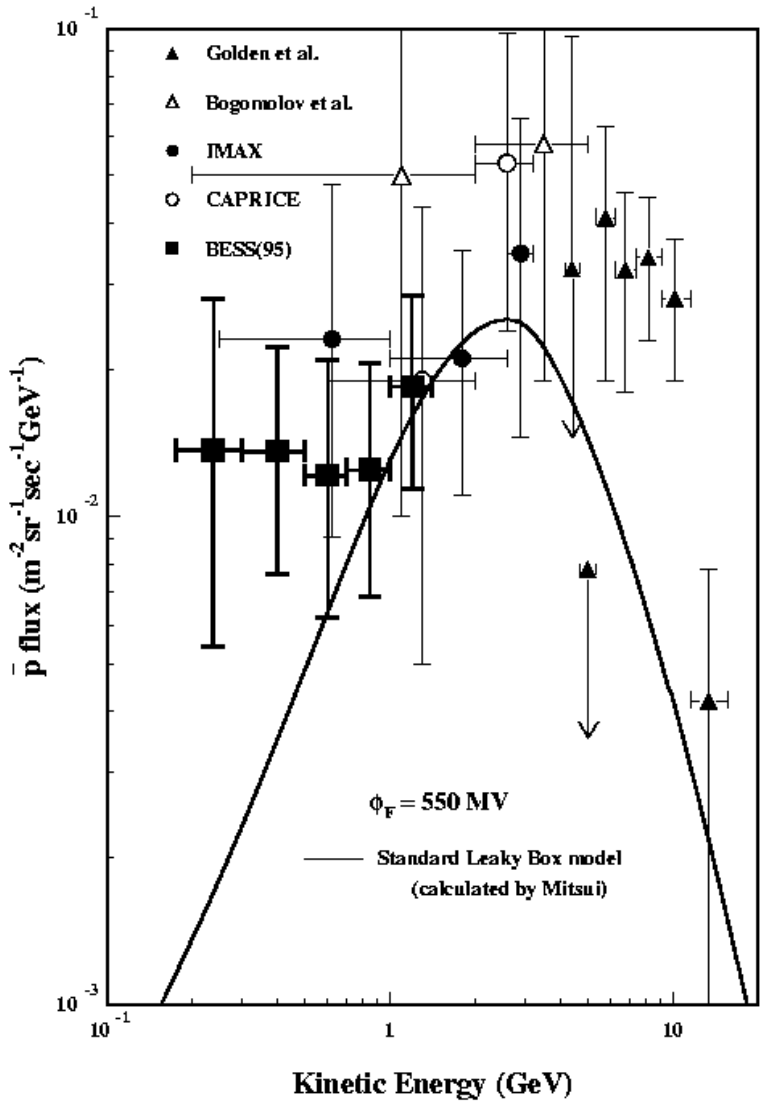

図 1.1: Standard Leaky-Box Model における $\bar{p}/p$ 比 (実線)

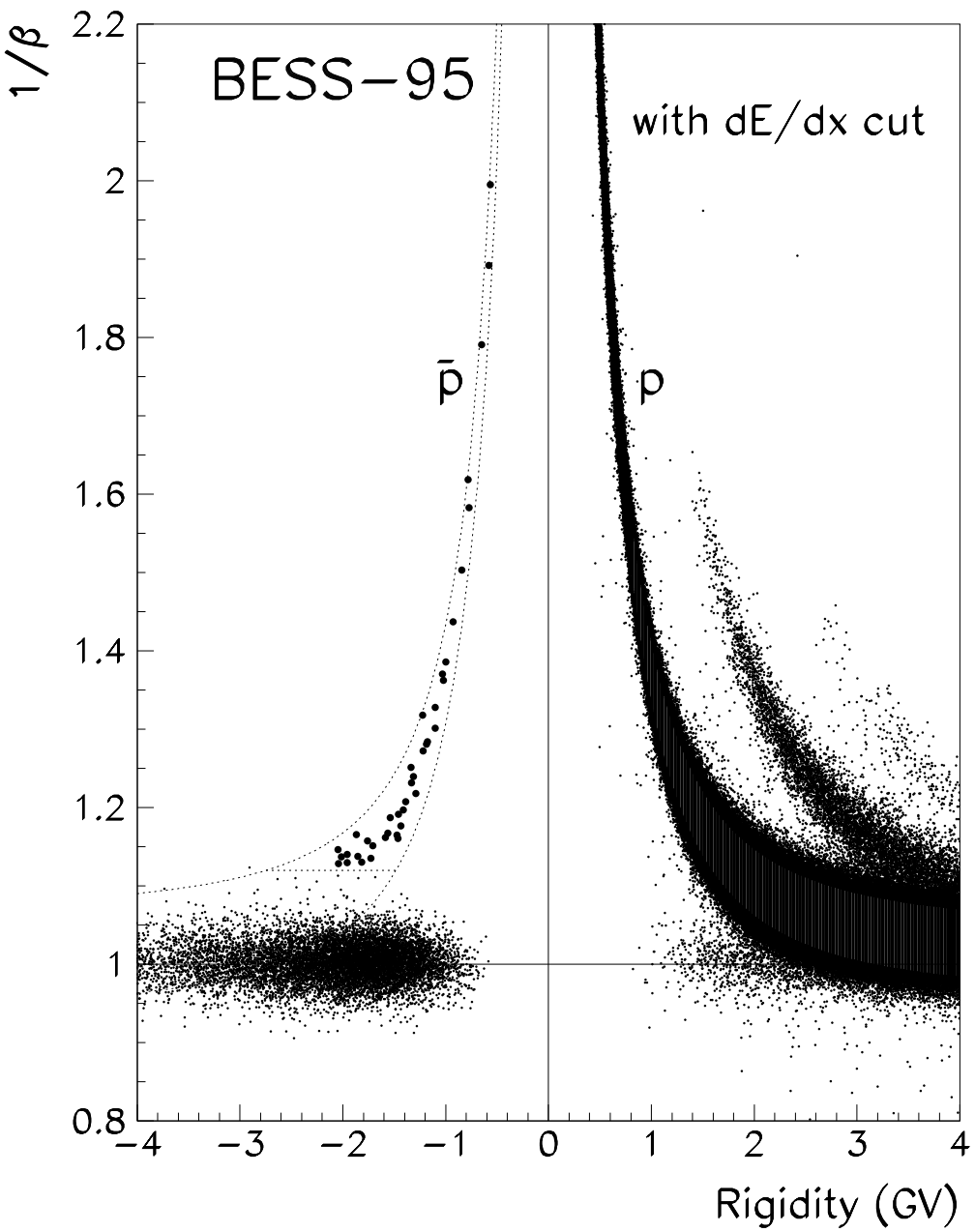

図 1.2: 質量同定による反陽子の識別 (95 年データ)

1.1.2　宇宙線中の反ヘリウムの探索

宇宙線中の反ヘリウムは、反陽子のように二次的な過程によって生成される確立は極めて低く、現在までその存在は確認されていない。モデルによっては宇宙に物質・反物質のドメイン構造が形成される可能性も指摘されており、数百 Mpc 程度の宇宙スケールのなかに反物質クラスターが存在すれば $\bar{He}/He$ 比で 10^{-6} オーダーの値を持つという指摘もある。(ref)

BESS では宇宙線中の反ヘリウムを探索し、この問題に対する実験的検証を行なっている。いまのところ '93、'94、'95 のフライトにおけるデータから $\bar{He}/He$ 比の上限として 3.1×10^{-6} という値が得られた。(図 1.3)

1.2　新型モニターシステムの必要性

BESS は 36 km 上空の厳しい環境のもとで実験を行なっている。このような条件の元で安全・確実にフライトを成功させる為、圧力容器で検出器や電子機器を外界の悪条件から保護し、さらに電子機器の発する熱や、超電導電磁石用の液体ヘリウム等の危険要因に対しても万全の対策を立ててはいるものの、万一の事故に備えて地上から測定器のオペレーションを行なっており、この際に実験環境のモニターデータが大変重要な指針となる。

BESS においてモニターすべき環境データは、その年に搭載されている検出器や電子機器構成に対応して場所や種類を変更するよう要求される。さらに将来に計画されている長期フライト実験においても、電源電圧など新たな情報をモニターする要求がでるものと予想されており、このような構成の変更や追加に対する要求に、容易に対応することができることが環境モニターシステムに必要である。

従来の環境データ収集システムはあらゆるセンサーからのデータを処理する回路が一つの箱の中に収められており、センサーの種類や数の変更に対して対応することが困難であった。

そこで新型環境データ収集システムは従来のこうした欠点をとりのぞき、種類、数、設置場所の変更など様々な要求に対して柔軟に対応できるように Local Object Network (3.1.1) を用いてネットワーク型のシステム形態として設計、製作した。このモニターシステムについての詳細は 3 章で述べる。

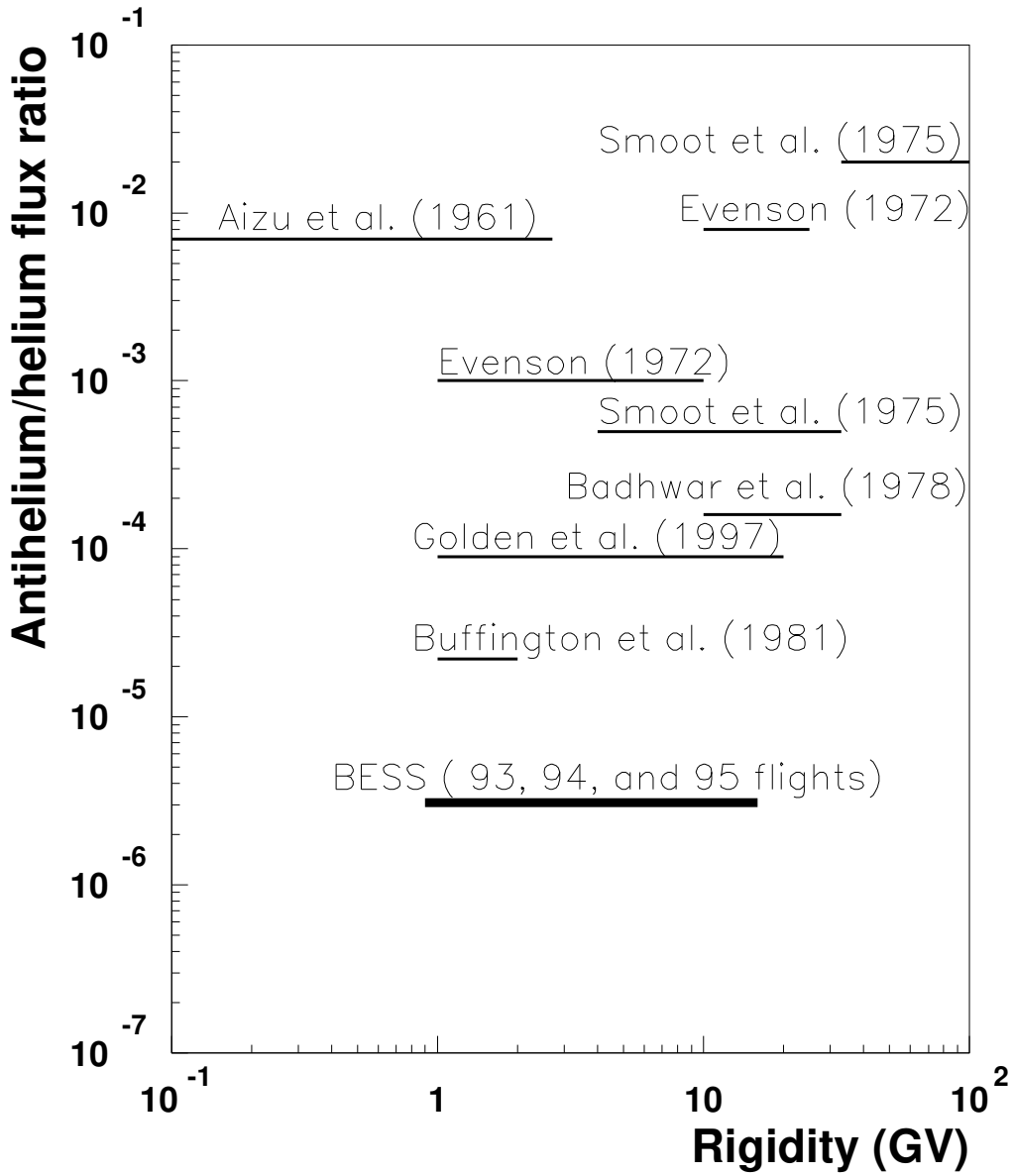

図 1.3: 反ヘリウム / ヘリウム比の測定。 ’９３ー’９５のデータから得た上限値と長期間フライトを行なった場合の測定感度。

第2章　BESS 測定器

BESS 測定器は加速器実験において培われた測定器技術を駆使して製作された気球搭載型超電導スペクトロメータである。過去の飛翔検出器と比べて約 40 倍の面積立体角をもち、搭載された高精度飛跡検出器によって非常に広いエネルギー範囲 (0.175 ~ 100GeV) を同時に測定することができる。そして並列型高速イベントデータ収集システによって、検出した大量の粒子から興味の対象となる粒子を online で選別し、40Gbyte の大容量記録装置に効率良く蓄積している

図 2.1 に BESS 測定器の断面を示す。

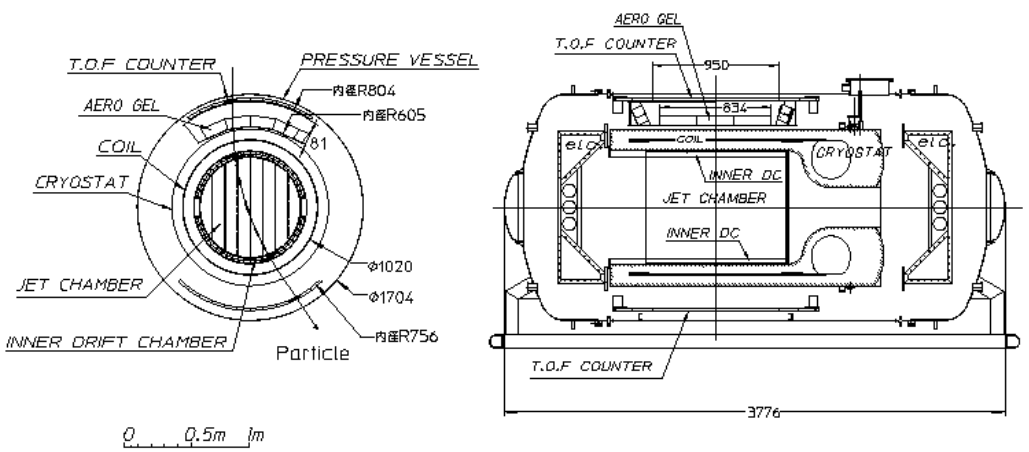

図 2.1: BESS detector の断面図

2.1 検出器

測定器は内側から jet-type drift chamber (JET チェンバー), inner drift chamber (IDC)、超電導ソレノイド電磁石 (MAG)、エアロジェルチェンコフカウンター (Aerogel)、time of flight counter(TOF) で構成されており、制御系や読み出し系の電子機器とともに pressure vessel (PV) に収められ、地上に近い環境に保たれている。MAG によって作られた磁場中をすすむ入射粒子の飛跡は JET チェンバーによって精密に測定され、ここから rididity[1]を求めることができる。そして TOF で測定される入射粒子の飛行時間とエネルギー損失をあわせ、入射粒子の電荷、質量、運動量を得ることができる。

上下 TOF のコインシデンスによって出力される 1st level trigger (T0trigger) によって BESS 測定器の読み出し系が起動され、さらに TOF と IDC のヒットパターンを logic 回路によって処理して粒子の電荷を判別し、膨大な低エネルギー陽子イベントの rejection を行なう。

以下に BESS の各検出器の特徴、性能などを述べる。

- Superconducting solenoidal **MAG**net
  薄型ソレノイド超電導電磁石。直径 0.8m 、長さ 1m の空間に 1T の磁場を 15% の均一度で発生する。永久電流モードにて、実験中電源の供給なしで磁場を発生し続けることが可能。その物質量は片側 0.2 輻射長と非常に薄く、入射粒子が反応を起こす確立が少なくなっている。

- **JET** type drift chamber
  入射粒子飛跡検出用の円筒型ドリフトチェンバー。直径 766mm 、長さ 1060mm。MAG の発生させる磁場中に設置されて、入射した粒子の軌跡を最大 24 point のヒットポイント (測定精度は r-ϕ 平面 200μm・Z 方向 10mm) のパターンから測定し、その運動量測定分解能は $\Delta p/p \sim 0.5p$(GeV/c)% となる。

- **I**nner **D**rift **C**hamber
  粒子入射位置検出用ドリフトチェンバー。内半径 384mm 、外半径 420mm 、中心角 156^o の円弧形で JET の外側上部、下部に一台ずつ設置される。チェンバー内の各センスワイヤー毎に 1 周期 100mm のダイアモンド型バーニアパッドが備えられ、JET の ヒットポイントの情報と合わせ、粒子の Z 方向の入射位置を 300 μm の精度で測定する。TOF とともに 2nd level trigger(track trigger) に用いられる。

- **T**ime **O**f **F**light カウンター
  入射粒子の飛行時間を測定するプラスチックシンチレーションカウンター。幅

[1]磁場中における粒子の直進性： 運動量 / 電荷

100mm 長さ 950mm(light guide を併せて 1526 mm) で、上部 10 本 下部 20 本、計 22 本 が検出器最外部に設置されている。'96 年まで上下とも中心から 650mm の位置に設置されていたが、'97 年度からは上 804mm 、下 756mm の位置に設置して粒子の飛行距離を長く取り速度分解能を上げている。また磁場中での使用となる為、ファイン メッシュ型の光電子増倍管 (PMT) を用いている。TOF の信号は入射粒子のエネルギー損失の測定や。BESS 測定器の T0 trigger、track trigger にも使用される。シンチレータの材質、PMT の変更などの改良によって、その時間分解能は '95 年度の 110ps から '97 年度の 75ps まで向上している。

- **Aerogel** Čerenkov Counter
  屈折率 1.03 のシリカエアロジェルを用いたスレッショルド タイプのカウンター。反陽子 とそのバックグラウンド となる電子、π^- とを区別する。厚さ 2cm の エアロジェル を 4 枚重ねてポリエチレンラップでラッピングされた 12 個 のエアロジェルブロックがシンチレーション光を検出するファイン メッシュ型 PMT とともに収納容器の中に収められており、これが MAG の上部に設置される。

2.2 データ収集システム

BESS DAQ システムは、地上との通信の為の通信サブシステム、実験中測定器内の状況をモニターする環境データ収集サブシステム、検出器からデータを読み出すイベントデータ収集サブシステム、あらゆるデータを記録するデータ蓄積サブシステムの四つのサブシステムから成り、それぞれが Omni-net[2] で結合されて相互に関係してデータ収集処理を行なう。それぞれの動作を独立させ処理を分担させることによって、開発効率と処理能率の高いシステムを実現している。(図 2.2)

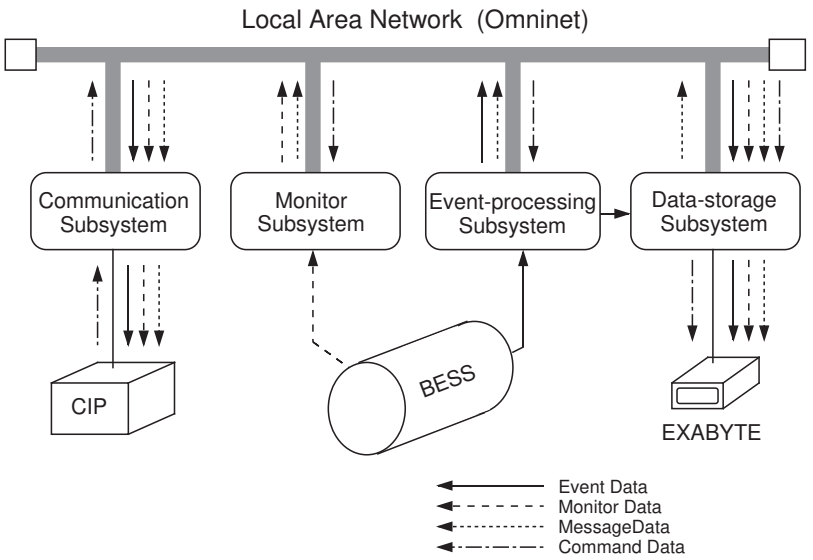

図 2.2: Schematic diagram of the data acquisition system

各サブシステムには Subsystem conductor と呼ばれるマイクロコンピュータが搭載され、サブシステム同士の通信や外部からのコマンドの処理を行ない、それぞれの機能に応じたインターフェースを通してサブシステム全体をを統括する。

Subsystem conductor の オペレーティングシステム (OS) には NEC リアルタイム OS RX116 が使用されており、これによって、その瞬間に必要な処理を即座に実行できるマルチタスクリアルタイム処理の環境を実現している。OS や、アプリケーションなどのソフトウェアは ROM 化されており、Subsystem conductor の起動時に RAM 領域に読み込まれる。

また、気球実験であることから搭載できるバッテリーが制限され、実験時間を長くとる為にはシステムの消費電力をできるだけ低く抑えなければならない。同時に電子機器の発生する熱が蓄積されると、検出器や電子機器自体を損傷してしまう可能性があり、冷却問題が深刻になってしまう。

[2]Corvus 社で開発された CSMA 方式の Local Area Network

BESS DAQ システムはこれらの要求に合うように電子機器のほとんどが独自に開発されたもので、消費電力、発熱を最低限に抑え、高速にデータを処理している。

2.2.1 通信サブシステム

通信サブシステムは他のサブシステムからのデータやメッセージを地上に送り、同時に地上からのコマンドを受けてそれを解釈し他のサブシステムに配送する。

実際の地上との通信は NASA の 機関である National Scientific Balloon Facility (NSBF) から供給される consolidated instrument package (CIP) が行なう。CIP は地上から送られてきたコマンドを 16bit-word のパラレルデータとして通信サブシステムの Subsystem conductor に出力する。また、Subsystem conductor からシリアルデータの入力を受け、これを地上に送信する。通信速度は地上から受けるコマンドに対して 1 word/sec 、地上に送るデータに対しては 16 Kbit/sec 程度となる。

通信サブシステムの Subsystem conductor は STD-Bus[3] 対応の各種基盤で構成され、通信用インターフェース (送信コントロールボード・受信コントロールボード) を通して CIP に対するデータ入出力を行なう。

以下に 通信サブシステムを構成するハードウェアの特徴について述べる。

- V40 CPU ボード
  通信サブシステム Subsystem conductor の中枢となる。CPU に CMOS マイクロプロセッサ V40 (μPD70208) を使用。アプリケーションプログラム用 ROM 32 Kbyte、 RAM 32Kbyte を搭載可能。V40 CPU はパソコン用 CPU として広く用いられていた 8086、V30 とソフトウェアの互換性を有しており、パソコン上でコンパイル、アセンブルしたマシン語コードを使用できる為開発を容易に進めることができる。また、RS232C の入出力端子を備えており、稼働状況をモニターすることが可能である。

- メモリーボード
  32Kbyte の ROM または RAM を 6 つ、合計 256 Kbyte のメモリーを搭載することができる。実際には RX116 用の ROM が 1 つ、RAM が 5 つ搭載されている。

- リアルタイムクロックボード
  バッテリーバックアップされたクロックボード。通信システム他全てのサブシステムのタイマーに参照され、時刻情報をシステム全体で統一する。

- Omni-net コントロールボード
  CSMA Controller Chip μPD72105 が搭載されており、Omni-net におけるネッ

[3] 8bit システムバス IEEE-961

トワーク管理、通信に関する処理は全てこのチップがこなす。通信バッファー用に 32 Kbyte の RAM も搭載されている。

- 送信コントロールボード
  Bit Oriented Protocol (BOP) 対応の Serial Contoroller μPD72001 が搭載されており、CIP に接続されて地上へのデータ送信に関する処理を行なう。

- 受信コントロールボード
  Parallel Contoroller μPD71055 が搭載されており、CIP に接続されて地上から送られてくるデータ受信に関する処理を行なう。μPD71055 はデータを受信すると割り込み信号を発生させて Subsystem conductor の CPU に伝える。

- 光絶縁ボード
  フォトカプラを装備し、DAQ システムと CIP を電気的に絶縁する。

- consolidated instrument package (CIP)

2.2.2 モニターデータ収集システム

モニターデータ収集システムは測定器の環境をセンサーから読みだしデータ化し、地上通信サブシステムとデータ蓄積サブシステムに出力する。

現在のモニターシステムは STD-Bus 上に構築された Subsystem conductor と、アンプ、ADC、マルチプレクサなどの回路が収められたモニターボックスと各種センサで構成されているが、センサの出力を読み出すモニターボックス内の回路が基盤化されて固定されてしまっており、柔軟性において問題がある。また、モニターボックスから離れた点をモニターする場合、センサーからのケーブルが長くなってしまい、好ましくない。

本論文の主題である新型モニターシステムは、このような問題を解決するべく開発された。新型モニターの詳細については 3 章以降で述べる。

2.2.3 イベントデータ収集サブシステム

BESS 検出器の トリガーレートは、上空においては 2 KHz 近くにもなる。このままでは可能記録速度をはるかに越えてしまうため、検出器から送られてくる大量のデータの選別を行なうことが必要になる。

イベントデータ収集サブシステムはトランスピュータ[4]を用いた並列処理型のサブシステムで、測定器から読み出されるシグナルを 、on line で高速に解析してイベ

[4]INMOS 社

ントの要・不要を判断し、結果を データ蓄積サブシステムに出力する。

データ収集の処理は、トリガーデータによって読みだしたデータの必要・不必要を判別し、必要であればイベントデータを構築する「Event Building」、そのイベントデータを解析し、更に細かく選別する「Event Filtering」の過程に分けられ、シリアルリンクで結合された＊＊＊個のトランスピュータによって行なわれる。

記録されるべきイベントデータはシリアルリンクを通して直接 データ蓄積サブシステムのトランスピュータに転送され、記録装置に蓄積される。

イベントデータ収集サブシステムの Subsystem conductor は PC9801Bus(98Bus)[5] 対応の各種基盤で構成され、トランスピュータインターフェースボードを通してサブシステムを統括する。

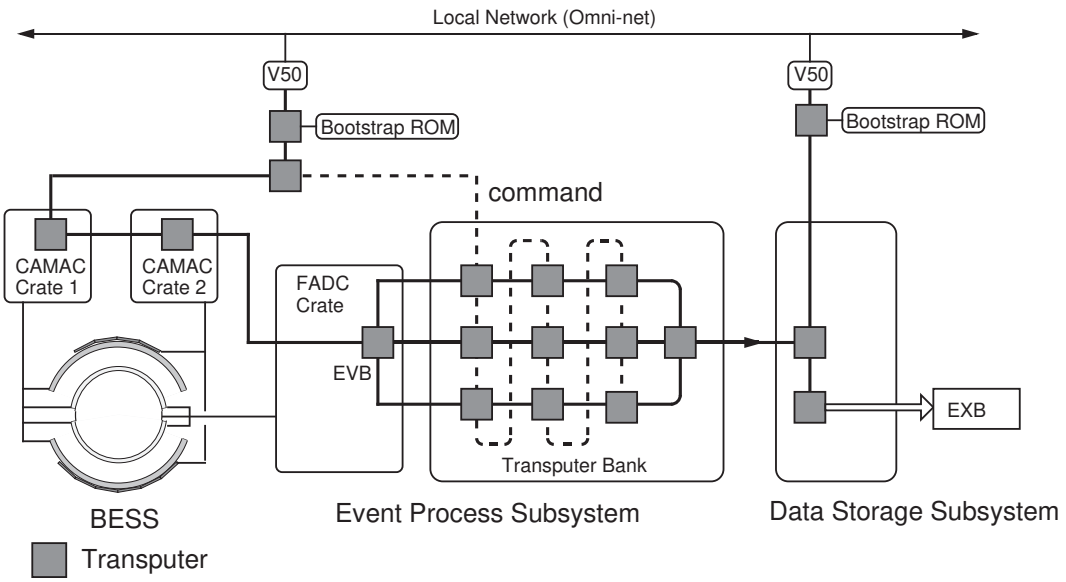

図 2.3: The block diagram of the Data Process and the Data Storage subsystem. A net work of transputers are constructed for the main function of the subsystems.

2.2.4 データ蓄積サブシステム

データ蓄積サブシステムは他のサブシステムから送られてきたイベントデータ、モニターデータ、メッセージ、コマンドなどのあらゆるデータを記録装置に記録する。

データ蓄積サブシステムは Subsystem conductor 、記録装置制御部、記録装置で構成される。

記録装置制御部は 2 つのトランスピュータと SCSI 制御用モジュールで構成される。1 台のトランスピュータは Subsystem conductor と接続され、送られてくるデー

[5]NEC パーソナルコンピュータ PC-9801 用拡張 Bus

タとコマンドの振り分けを行ない、もう 1 台のトランスピュータで走る 2 種類のプロセスがこの振り分けられたデータ、コマンドを処理、実行する。またこのトランスピュータはイベントデータ収集サブシステムのトランスピュータとも接続されており、送られてくるイベントデータを記録装置に書き込む。

データ蓄積サブシステムの Subsystem conductor はイベントデータ収集サブシステムと同等内容のもので、PC-9801Bus(98-Bus) 用の基盤で構成され、トランスピュータインターフェースボードを通してサブシステムを統括する。

記録装置には 8mm カートリッジテープ記録装置 EXABYTE EXB-8900 2 台が使用されている。2 台で 40Gbyte（ 圧縮なし ）の記憶容量があり、最高記録速度は 6 Mbyte/sec となっている。

第3章　環境モニターシステムの開発

この章では BESS の為に新しく開発したモニターシステムについて述べる。

BESS は無人の測定器を気球で高空に飛ばして行なう実験である。実験中の DAQ オペレーションは地上からコマンドを送ることによって行なわれているが、測定器の周囲は真空、極低温といったような厳しい環境で、圧力容器の中とはいえ取扱いに細心の注意を要する検出器・電子機器・超電導電磁石の付近の状態をリアルタイムに把握しておくことが重要となる。

今回開発したモニターシステムは、従来のシステムになかった柔軟性を求める為にセンサーの読み出し系を分散させたネットワーク型のシステムとなっている。これによって検出器の種類・構成の変更時や今後に計画されているの長期フライト実験において要求されるであろうセンサーの追加・変更などに柔軟に対応できるようにした。また、ソフトウェアレベルにおいても各構成要素のプログラムに個々の動作に対する全ての責任を持たせ、プログラム同士のメッセージ伝達によってシステムを構成するオブジェクト指向型の設計 [18] がなされており、システム全体での異常箇所の早期発見やプログラムの修正・変更を容易にしている。

BESS の環境モニターは、上空で測定器内のセンサーからデータを収集してデータを地上とデータ蓄積システムに送信する環境データ収集システムと、地上でデータを受けとってコンピュータの画面上にリアルタイムな測定器状況を表示するためのモニターディスプレイシステムによって行なわれている。(図 3.1)

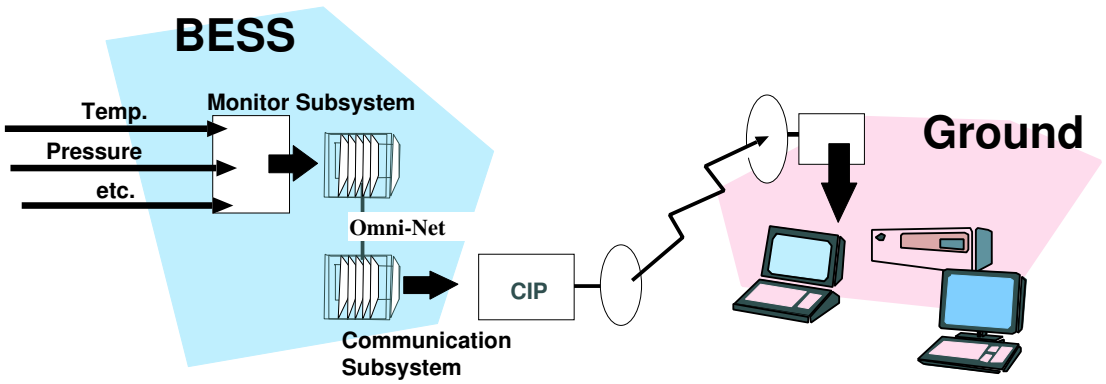

図 3.1: BESS の実験環境のモニタリング

3.1 環境データ収集システム

環境データ収集システムは、測定器内の任意の場所に配置されセンサーからデータの読み出しを行なうセンサーノードと、システム全体の制御を行なう Subsystem conductor がシリアルリンクで接続されたネットワークシステムである。(図 3.2)

ネットワーク技術には Local Object Network (LON) を採用し、その充実した総合開発環境によって、短時間で安価なシステムを実現することができた。

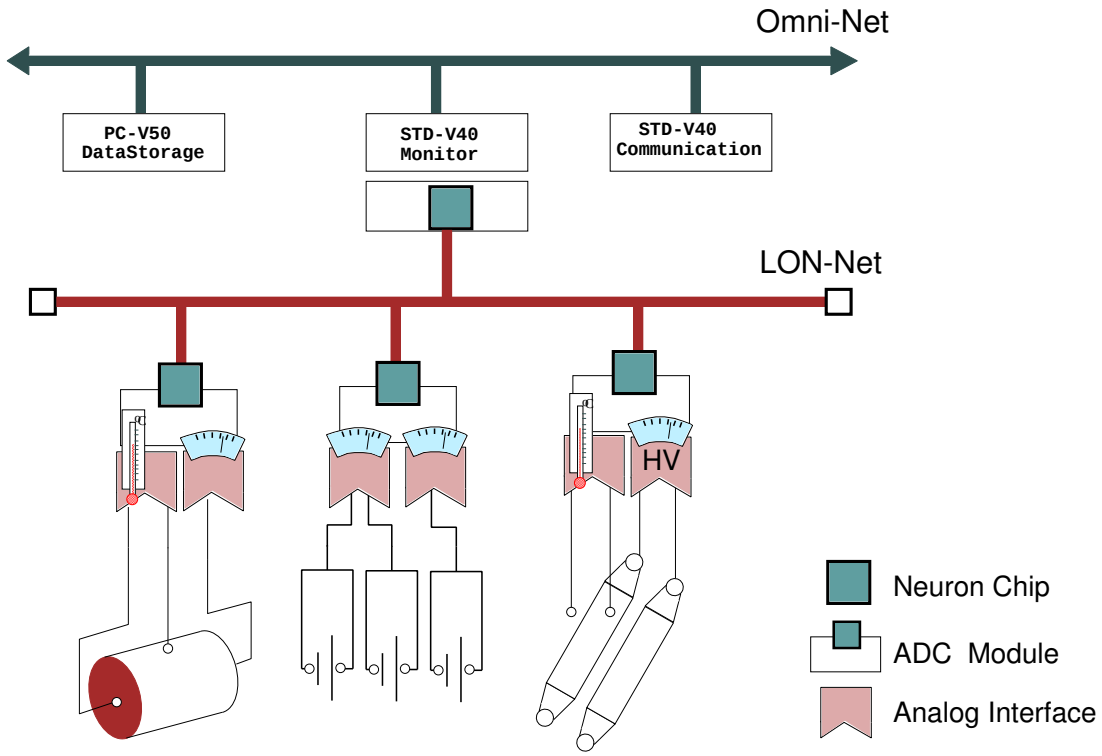

図 3.2: LON Network for Environment Monitor

3.1.1 Local Object Network

Local Object Network (LON) は Echelon 社が開発した 検知・監視・制御その他のアプリケーションを実行する分散型システムを容易に構築することができるネットワークシステムである。LON は LON ノードと呼ばれる Neuron Chip を中枢としたインテリジェントデバイスで構成され、これらが LON トークプロトコルによって論理的に結合する。

- LON トークプロトコル
  LON トークプロトコルは LON で使用されるネットワークプロトコルで、国

際標準化機構 (ISO) で開発された解放型システム相互接続 (OSI) の参照モデルに準拠しており、その定義にしたがって OSI 参照モデルの全 7 レイヤ[1]におけるサービスをサポートしている。

- LON ノード
  LON ノードは Neuron Chip を中心に、センサー、スイッチ、LED やキーパッドなどのデバイスで構成され、1 つのアプリケーションを実行する。そして複数の LON ノードが LON トークプロトコルによって相互に通信を行ない、より複雑なアプリケーションを実現することができる。

- Neuron Chip
  Neuron Chip は LON ノードの中枢となって、通信、I/O 制御、アプリケーション処理を実行するワンチップコンピュータである。Neuron Chip には ROM 内蔵型の 3120 type と 外部メモリーへのインターフェースを持つ 3150 type とがあり用途によって使い分けることができる。どちらもアプリケーションハードウェアへのインターフェース用に 11 本の双方向 I/O 端子を持ち、これらをソフトウェアで簡単に制御できるほか、内蔵している 3 つの 8bit CPU のうち 2 つが通信専用に使われていて複雑なプロトコル処理も自動的にこなす。

実際の Neuron Chip の実装には汎用的な回路があらかじめ装備されたミニボードを使用することができて、(ref) LON ノードのハードウェア開発を非常に簡単なものにしている。ミニボードには 3150 type の Neuron Chip と 5 Mhz クロック、メモリ用ソケット、TP-RS485 トランシーバ回路が装備されている。メモリは 32kbyte PLCC タイプの ROM を搭載することが可能で、ROM を交換することでさまざまなアプリケーションに対応できる。また、TP-RS485 トランシーバ回路が装備されているので、より対線をトランシーバ端子に接続するだけでネットワークに接続することができる。さらに、Neuron Chip の 11 本の I/O 端子と RESET 端子、SERVICE 端子が buffer なしで出ているので、これらをそのままノードの回路に利用できる。

[1]物理、リンク、ネットワーク、トランスポート、セッション、プレゼンテーション、アプリケーションの 7 層

3.1.2 センサーノード

センサーノードは各種センサー、アナログインターフェース、ADC モジュールで構成され、検出器まわりの温度、圧力や電源電圧などの情報をデジタル化し、これをデータ収集ノードに送る。以下にその構成要素の特徴を述べる。

- ADC モジュール
  センサーノードの中枢部である。Neuron Chip によって制御される 32 channel の ADC 回路が、コンパクトなハウジングケースの中に収められる。ノード固有情報 (Network ID 、センサーポイント数等) は ROM に記録され、電源投入時に NeuronChip に読み出される。

  0-5V の範囲で入力された 32 channel 分のアナログデータはマルチプレクサで選択され、順次 ADC へと送られる。ここでアナログデータはデジタル化されて NeuronChip に読み出される。Neuron Chip ミニボードは回路の他の部分と PhotoCoupler によって電気的に絶縁されている。(図 3.3)

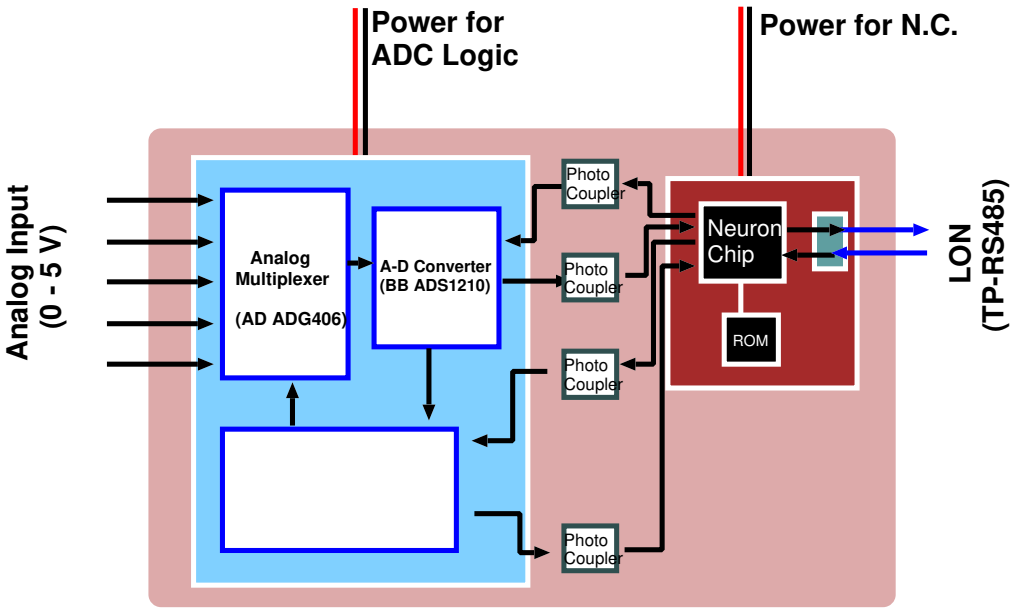

図 3.3: ADC モジュールのブロックダイアグラム

- 各種センサー
  温度センサー、圧力センサー、傾斜計など様々である。これらは最寄り系統、もしくは ADC モジュールから電源を取って、情報を出力する。

- アナログインターフェース
  センサーの出力を ADC のダイナミックレンジに合うよう調整するための抵抗

分割、アンプ等で構成される回路である。これによって様々な種類のセンサーに対応することが可能である。例として温度センサー用インターフェースの回路図 (図 3.4)、電源電圧用インターフェースの回路図 (図 3.5) を示す。

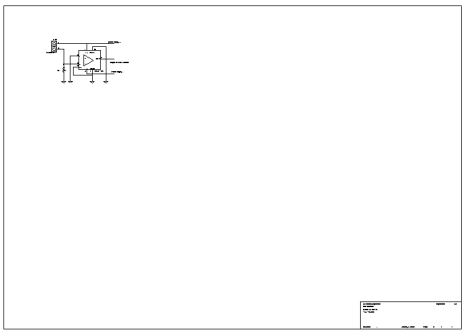

図 3.4: 温度センサー用インターフェースの回路図

図 3.5: 電源電圧用インターフェースの回路図

センサーノードのソフトウェア

センサーノードのプログラムは Subsystem conductor への接続を確認し、センサーから読み込んだデータの送信や、送られてきたコマンドへの対応といった処理を行なう。

センサーノードは起動されるとまずノードの初期化手続きを実行する。ここでは ADC などのハードウェアの初期化とノード状態の設定、内部タイマの初期化が行なわれる。初期化手続きが終了すると、タイマに時間を設定してイベント待ちループにはいる。ここで内部タイマが 0 になると timer_expires イベントを発生し、他のノードからコマンド (メッセージ) を受信すると msg_arrives イベントを発生する。発生したイベントに対する対応はノード状態によって変化する。センサーノードの状態遷移図を図 3.6 に示す。

AFTER_RESET はリセット後接続確認が終るまでの状態である。この状態において timer_expires イベントが発生すると、ID、Node Size などといったノード固有情報を Subsystem conductor に対して送信する。この返事として Subsystem conductor から accept メッセージが届くことで接続確認処理の完了となり、状態 DATA_SEND に移行する。

DATA_SEND は接続確認が終了し、周期的にデータ送信を行なう状態である。この状態において timer_expires イベントが発生すると、ADC からデータの読み込みが行なわれ、そのデータを Subsystem conductor に送信する。これは外部から reset コマンドが送られてくるまで続けられる。

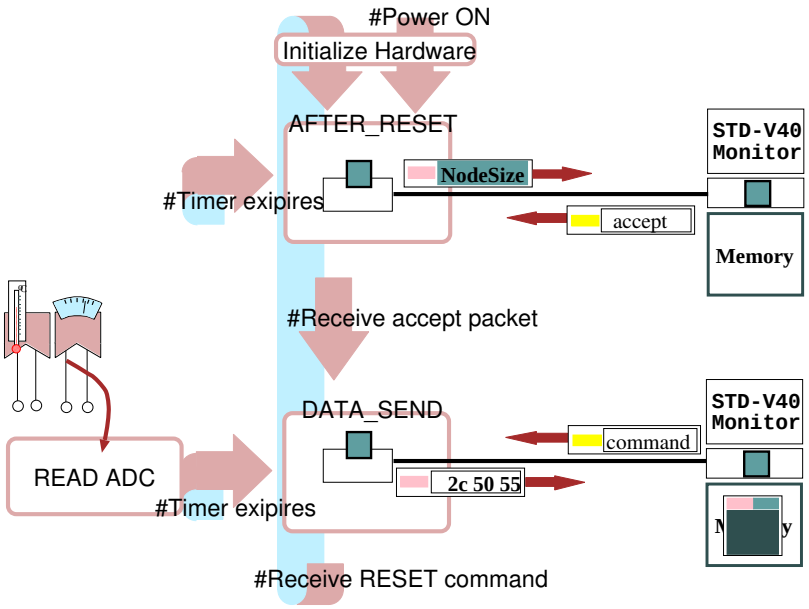

図 3.6: センサーノードの状態遷移図

3.1.3 環境データ収集システムの Subsystem conductor

Subsytem conductor は、地上通信システム (2.2.1)とほぼ同様のもので、STD-Bus に V40 CPU ボード、メモリーボード、Omni-net コントロールボードと、モニターネットワークへとつながる LON コントロールボードを搭載しており 3.7、外部サブシステムとの通信、コマンドの処理を行ない、環境データ収集システムの中枢として全体の制御を行ない、センサーノードから集められたデータを一次的にメモリーに蓄積し、周期的に他のサブシステムへ送信する。

LON コントロールボードは LON との通信を行なう為に STD-Bus 用 に作成した基盤で Neuron Chip ミニボードを搭載している。実際の LON との通信はすべてこの Neuron Chip によって行なわれ、Subsystem conductor は STD-Bus を通して LON コントロールボードとデータのやりとりを行なうだけである。

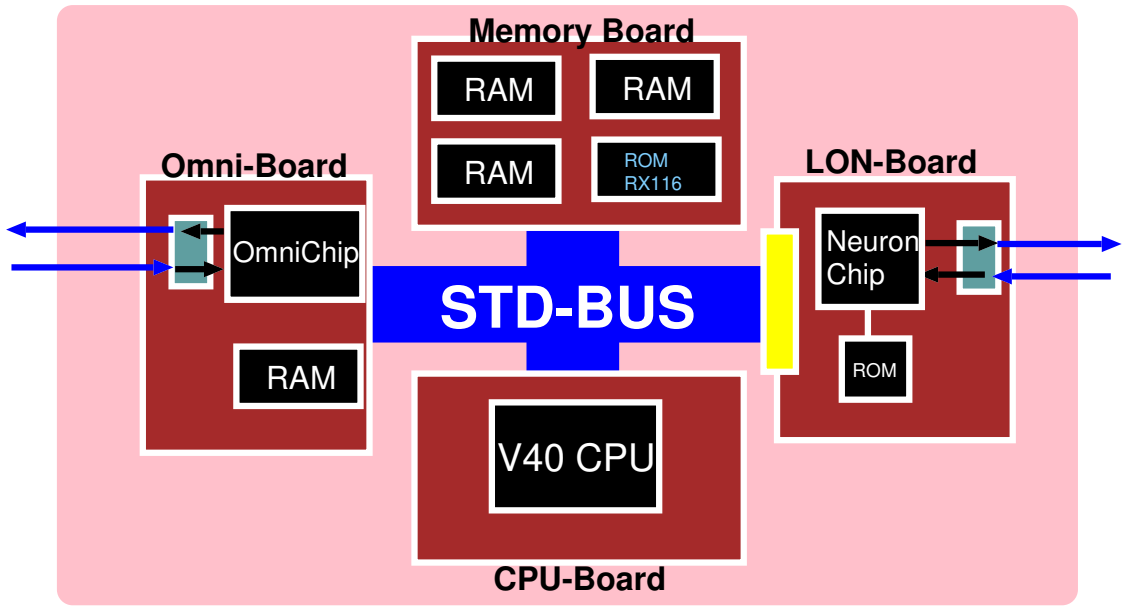

図 3.7: データ収集ノードのブロックダイアグラム

Subsystem conductor のソフトウェア

Subsystem conductor のプログラムは、他のサブシステムとの交信や、コマンドへ対応といった対外的な処理と、接続されたセンサーノードの管理や、送られてきたデータの一時蓄積といったモニターシステムの中枢としての処理を行なっている。

Subsystem conductor のプログラムは Omni-Net ドライバ、コマンドプロセッサ、モニターシステムドライバーの 3 つに大別される。モニターシステムドライバーは、さらに LON インターフェースドライバとモニターシステムコントローラに分けら

れる。これらのプログラムは、リアルタイム OS RX116 でタスクとして登録され、ハードウェア割り込みやメッセージ着信などのイベントの発生により随時起動される。(図 3.8) それぞれのタスクではメールボックスを設置して他のタスクからのメッセージを受け付けることが可能である。

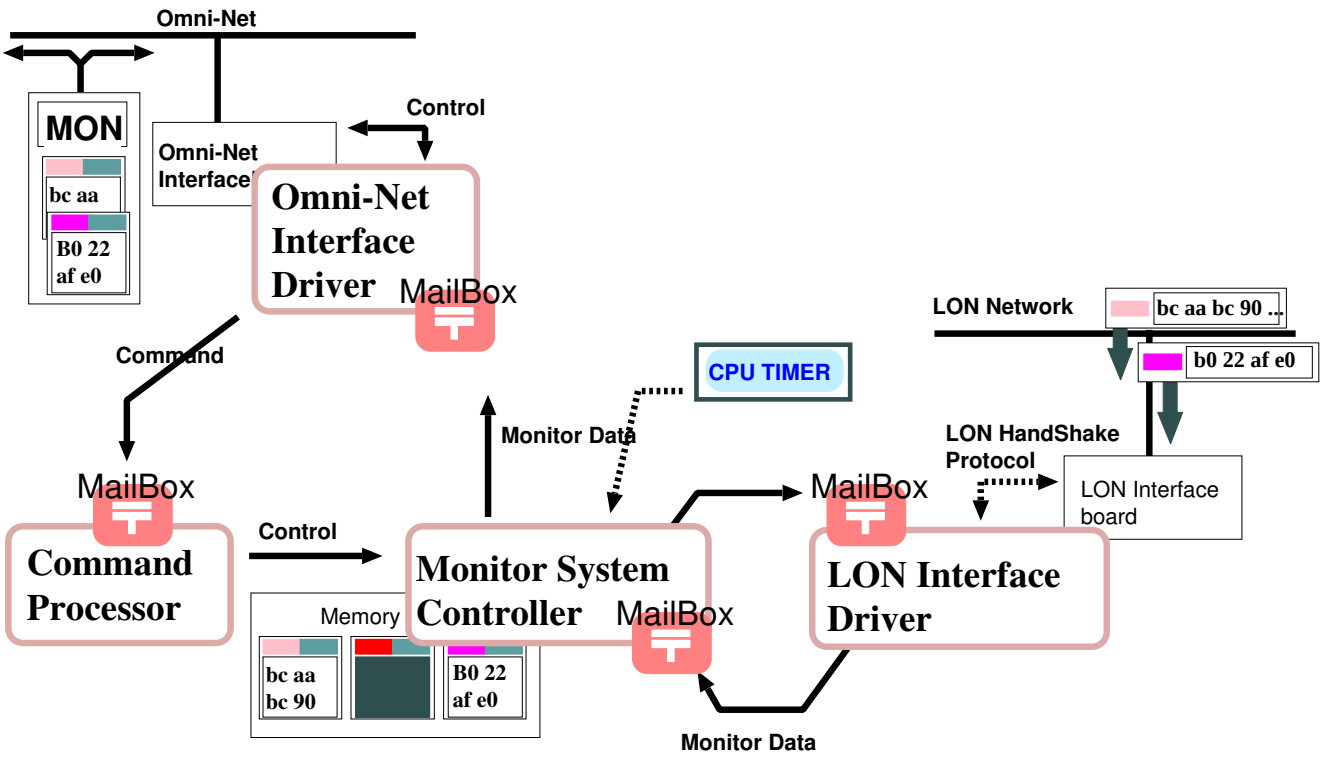

図 3.8: 環境データ収集サブシステムの Subsystem conductor のプログラム構成

- Omni-Net インターフェースドライバ
  Omni-Net インターフェースボードを直接制御して他のサブシステムとの通信を行なうプログラムである。Omni-Net ドライバはメールボックスに投函されたメッセージ (データ) にヘッダー情報を付けてパケットにまとめ、指定された宛先へ送信する。また、受信したパケットのヘッダーを解釈し、適切なタスクへ配信する

- コマンドプロセッサ
  メールボックスに投函されたコマンドを解釈し、OS RX116 に対するオペレーションを行なったり、他のタスクにコマンドを伝える等の処理を行なう。

- モニターシステムコントローラ
  モニターシステムそのものの制御を行なうサブルーチンである。モニターシス

テムコントローラは接続確認されたノードの ID やデータサイズ (センサーの数) 、データの更新状況などの情報を管理する。また、センサーノードから送られてくるモニターデータを周期的に地上通信サブシステム、データ蓄積サブシステムに配信する。

- LON インターフェースドライバ
  LON インターフェースボードの Neuron Chip と交信して LON との通信を行なう。Neuron Chip との交信はトークンパッシング方式の Neuron ハンドシェークプロトコル (図 3.9) が使用される。実際の LON の通信は LON インターフェースボード上の Neuron Chip が自動的に行なう。LON ドライバはメールボックスに投函されたメッセージ (データ) をパケットにまとめ、インターフェースボード上の NeurconChip に渡す。また、NeuronChip が受信したパケットをそのまま受けとり、モニターシステムコントローラのメールボックスに投函する。

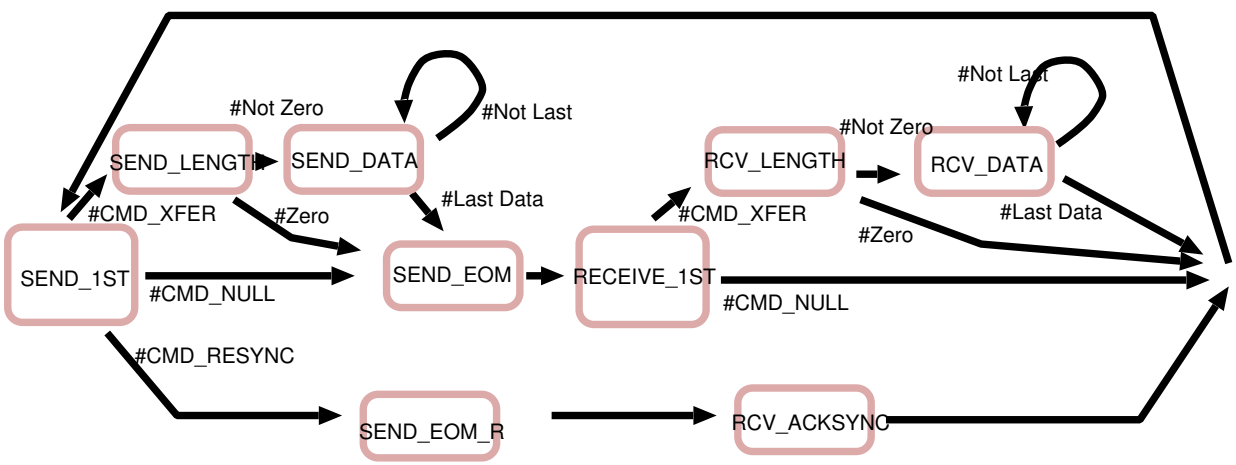

図 3.9: Neuron ハンドシェークプロトコル (V40 側 LON I/F ドライバの状態遷移図)

3.2 地上モニターシステム

地上モニターシステムは気球から送られてきたモニターデータをディスプレイに表示し、上空で稼働中のデータ収集システムや検出器や電源の制御システムのオペレーションの為のシステムである。(図 3.10)

地上モニターシステムは NSBF 通信機器とシリアルリンクで接続され、上空との通信をおこなう。

上空から送られてきたデータは NSBF の通信機器 からシリアルデータとしてパーソナルコンピュータ (PC-9801) に読み込まれる。このパーソナルコンピュータがパケットを TCP/IP プロトコルで UNIX ワークステーションに流す。このワークステーションに接続された端末のディスプレイにモニターデータや各サブシステムからのメッセージを表示して、オペレーターに上空での状況を知らせている。

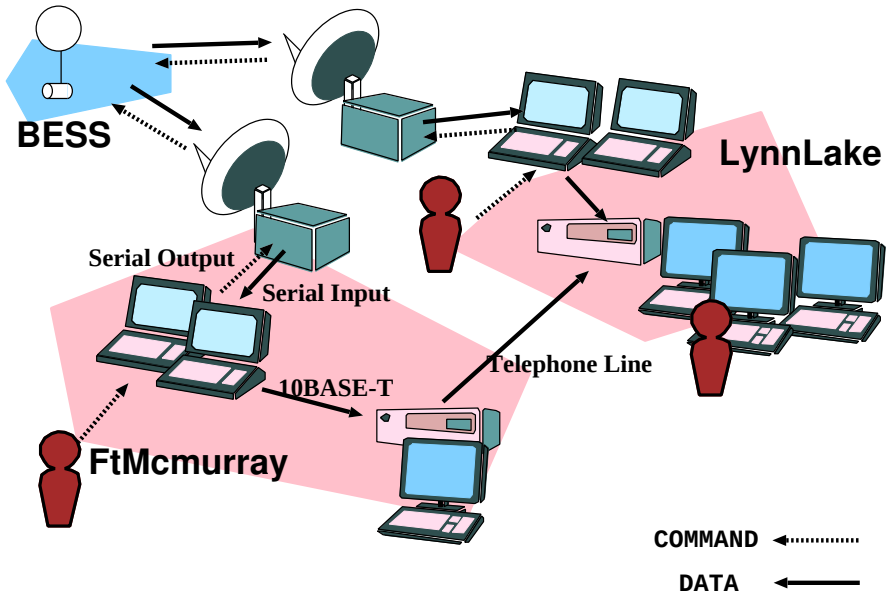

図 3.10: 地上モニターシステム

3.2.1 地上モニターシステムのソフトウェア

今回の新型モニターの開発にあたり、地上モニター用のソフトウェアにも変更の必要が生じた為、これを作り変えた。プログラム言語には C++ が使用され、UNIX サーバー上で動作する。

パケット配信

地上 UNIX サーバーでは複数の端末で必要なデータをモニターできるようにパケット配信プロセス bess_online_lon が常駐する。このプロセスは上空からデータを受けとる機器とのインターフェースプログラムとデータ処理 (表示) プロセスに接続されデータを配信するパケットサーバで構成される。(図 3.11) 上空から送られ

てくるパケットはファイルに記録され、そのヘッダー情報をもとに分類される。分類されたパケットはパケットサーバからクライアントであるデータ表示 (処理) プロセスへ転送される。

パケットサーバはパケットの種類毎[2]に用意される。パケットサーバーとクライアントとの通信は UNIX のプロセス間通信機構を用いて実現されている。パケットサーバにはそれぞれにサービス名が設定されており、クライアントはこの名前を用いて接続要求を行なう。この要求に対してパケットサーバは新しい回線 (socket) を用意する。そしてこれらの回線を管理して接続処理・パケット送信処理・例外処理を行なう。

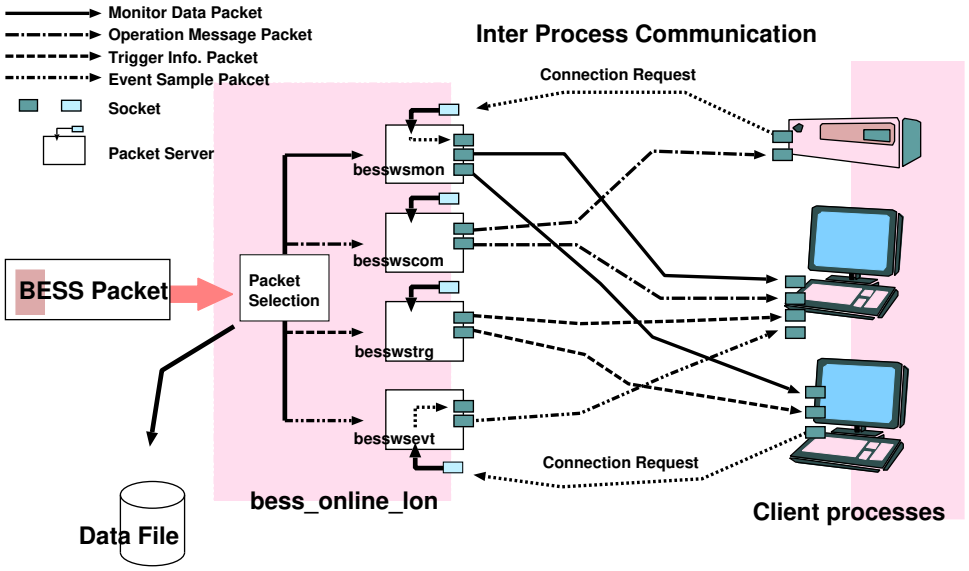

図 3.11: bess_online_lon

[2]モニターデータ、メッセージ、イベントサンプル、トリガー情報の 4 種

データディスプレイ

bess_monitor_lon はパケット配信プロセス bess_online_lon に接続されるクライアントとして作成されており、送られてきたメッセージやモニターデータなど、必要な情報を選択して X 端末に表示させることができる。図 3.12 は bess_monitor_lon が、実際にモニターネットワークから送られてきた情報を表示しているところである。

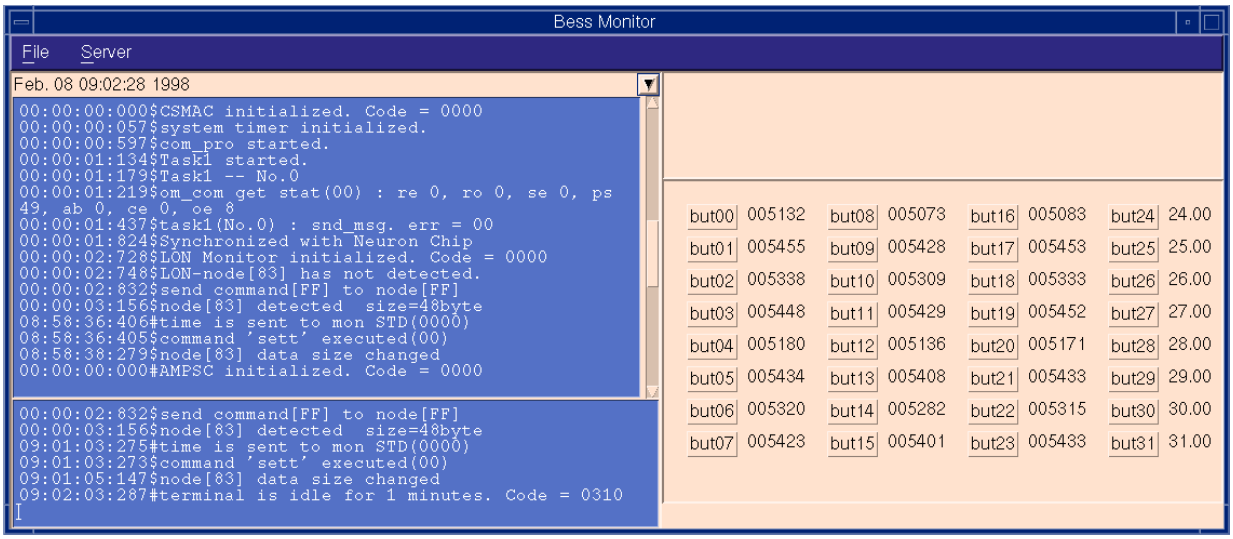

図 3.12: bess_monitor_lon (Ver. 0.02) の画面：メッセージ、モニターデータを表示している

3.3 動作確認

地上での超電導電磁石 1T 励磁試験中に図 3.13 のセットアップにおいて新型モニターシステムの動作確認をした。

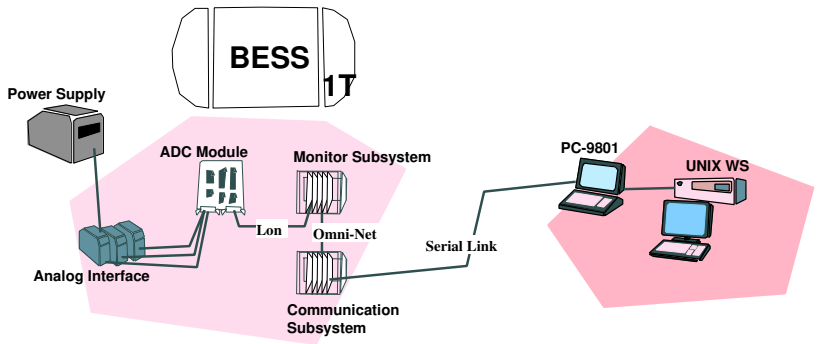

図 3.13:

センサーノード、Subsystem conductor を BESS 測定器中の搭載予定箇所付近に設置し、Omni-net で通信サブシステムと接続する。通信サブシステムの CIP への出力となる信号を直接地上モニターシステムの PC-9801 に接続し、イーサーネット経由でワークステーションに送る。センサーノードへの入力には一般に使用される 15V 電源を使用した。図 3.14・3.15 はその時送られてきたデータである。

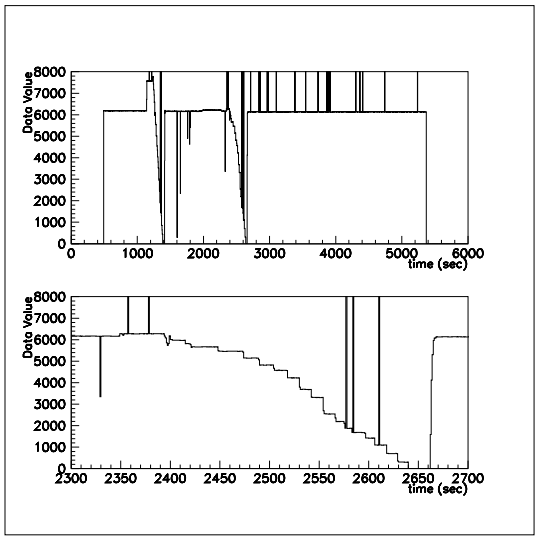

図 3.14: UNIX WS で記録されたセンサーノードからのデータ。縦軸がデータの値、横軸が時間 (秒)

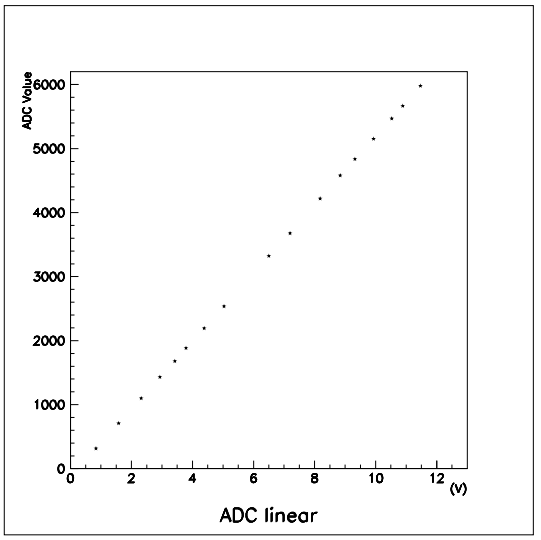

図 3.15: 磁場中での ADC 値。縦軸 ADC 値。横軸はアナログインターフェースへの入力電圧 (V)

記録された値のなかに突然おかしな値が混じっているが、これは ADC モジュールの ADC の使用法に問題があって上下 byte が入れ替わってしまった為である。現在このバグは修正され、全く安定した値を出すようになっている。

以上のように、センサーノードから送られてきたデータを LON 、Omni-net 、地上モニターシステムを経て、WS に記録できることが確認された。今後はアナログインターフェースや ADC モジュールを読みとるセンサーや設置場所によって製作し、長期間に渡って動作試験を繰り返してその安定性を確認する必要がある。

第4章　今後のデータ収集システム

最後に BESS データ収集システムで今後改良すると良いと思われる点について述べる。

4.1　1バス型システムへの移行

ここ数年、コンピュータがすさまじい進化をみせており、次々に新型の CPU が発表されてきた。これによって BESS データ収集システムの Subsystem conductor に用いられている CPU やシステムバスが時代遅れのものとなってしまい、基盤やマニュアルの入手が困難になるという保守上の問題が出てきた。この問題を解決するためにはシステムを新型化する他にはない。この場合単に CPU とバスを載せ変えるということではなく、現在もしくは将来における状況をよく考慮に入れて設計する必要がある。

現在の BESS データ収集システムは先にも述べた通り、イベントデータ収集、モニターデータ収集、データ蓄積、地上通信の 4 つのサブシステムがそれぞれに CPU で制御され、ネットワークを介して相互に関連して 1 つのシステムを構成している。

このシステムの主な利点として次の 2 つのことがいわれている。すなわちそれぞれのサブシステムが独立して処理を行なうことによって他のシステムの動作の詳細を関知する必要がなくなり、開発効率が向上すること、もうひとつは処理の分散を行なうことで各 CPU への負担が軽減され、処理能率が向上することである。特に後者については CPU の能力の低かった時代において大変重要であり、分散型のシステム形態をとったことは大成功だったといえる。

ところが現在ではシステムの保守に多くの人数を割り当てることができず、ほとんど一人に任せてしまいたいとう状況となっている。この場合, 分散型のシステムだとシステム全体として使用されるハードウェア、ソフトウェアの種類や数が増え、これらの理解と管理に大変な労力を費やさなくてはならず、開発効率がむしろ悪くなることも考えられる。

また、システム中で高速処理を必要とするイベントデータ収集システムは、すでに複数のトランスピュータによる高速並列演算処理システムを実現しており、他の部分において CPU への負担軽減を目的とした分散化は必要ないものと思われる。

以上の理由からデータ収集システムは 4 つのサブシステムへのインターフェース

を 1 つのシステムバス上に構築し、これらの制御を 1 つの CPU で行なう 1 バスシステムを新型 DAQ の候補として推薦しておく。

4.2 LON による測定器制御

前にも述べたように、LON は高速処理を必要としないアプリケーションの実現に大変適したシステムである。BESS 実験ではモニター以外にも電源スイッチ制御に LON を利用している。さらに今後の導入を検討したいアプリケーションに LON での測定器制御がある。

BESS での測定器制御 (HV コントロール等) の回路と、そのレスポンスのモニター用の回路をひとつの LON ノードとして作成すれば、複雑なオペレーションを Neuron Chip に実行させたり、制御結果をモニターしたりすることが可能になる。

今後開発される測定器制御のモジュールは、このように Neuron Chip によってインテリジェント化し、LON をとおして制御できるようすると便利であろうことをここに述べておく。

謝辞

本研究を進めるに当たり、御指導頂きました武田 廣 先生、野崎 光昭 先生、川越 清以 先生、本間 康浩 先生、横山 千秋 先生、三井 唯夫 先生に心から感謝致します。有難うございました。

参考文献

[1] K. Yoshimura, et al. (BESS collaboration): Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 3792.

[2] R.L.Golden, et al.: Phys. Rev. Lett. **43** (1979) 1196, E.A.Bogomolov, et al.: Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf., Moscow, Vol. 2 (1987) p.72; Proc. 21th Int. Cosmic Ray Conf., Adelaide, Vol. 3 (1990)p.288.

[3] S. W. Hawking:Nature **248** (1974) 30. K. Maki, T. Mitsui and S. Orito: Phy. Rev. Lett. **76** (1996) 3474.

[4] G. Jungman and K. Kamionkowski: Phys. Rev. D **46** (1994) 2316. K. Maki: Master Thesis, University of Tokyo, 1995.

[5] T. Mitsui: Ph. D. Thesis, University of Tokyo, 1996.

[6] T.Saeki, et al. , Jan. 1998

[7] BESS collaboration: to be published.

[8] M. Imori, et al.: IEEE Trans. Nucl. Sci **NS-39** (1992) 1389.

[9] T.Saeki, et al.: Nucl. Instr. Meth. A **355** (1995) 506.

[10] T. Mitsui, K. Maki and S. Orito: Phys. Lett. B **389** (1996) 169.

[11] RX116(Ver 2.1) 16ビット・リアルタイム・オペレーティング・システム 基礎編, NEC ,1990

[12] LONワークス製品概要, 東芝,1991

[13] LONワークス応用入門, 東芝,1991

[14] Product Preview 分散型プロセッサ Neuron Chip, モトローラ,1991

[15] LON WORKS Twisted Pair Control Module User's Guide, ECHELON,1992

[16] D. A. ヤング・J. A. ピュー, X Toolkit プログラミング OPEN LOOK版, トッパン,1992

[17] D. A. クリ, UNIX C プログラミング, アスキー,1991

[18] T. A. バッド, オブジェクト指向プログラミング入門, トッパン,1992