

BESS 測定器におけるデータ収集系 情報制御システムの開発

**神戸大学大学院自然科学研究科物理学専攻
粒子宇宙物理学研究室
002S118N
松川武夫**

平成 14 年 2 月 8 日

概要

宇宙における様々な素粒子現象の探求を目的として建設された気球搭載型超伝導スペクトロメータ (BESS) は反陽子、陽子、ヘリウムといった各種宇宙線の測定を行っている。なかでも宇宙線反陽子流束の精密測定に対してはとりわけ力を注いできており、その観測データは BESS 実験の最も重要な成果とされる。また、98 年のフライトにおいては 1~120GeV の宇宙線陽子、ヘリウムのスペクトラムを精密に測定した。現在、BESS-TeV 計画と呼ばれる宇宙線精密測定の可能なエネルギー領域を 1TeV まで上げること为目标とした開発が進められ、今年の 8 月~10 月にかけて米国ニューメキシコ州のフォートサムナーにてフライトが実施された。

BESS のデータ収集システムについては開発されてから約 10 年間使われてきた。当時としては高性能であったシステムではあるが、時が経つにつれて部品の入手さえ困難になりつつある。そのためメンテナンスや改良が難しくなり、また新たなデバイスを追加しようにも対応が取り難い。しかし、現在出回っている低消費電力で高性能な部品を使用して新しいシステムを開発すれば、柔軟性、汎用性に富んだより良いシステムが期待できる。

ここでは従来のシステムの動作内容を基に開発され、今年のフライトに搭載されたデータ収集システム内の新たな情報制御装置についてその開発状況と動作内容等を報告する。

目次

第 1 章 Introduction

- 1.1 宇宙起源反陽子の探索
- 1.2 Solar Modulation の測定
- 1.3 反ヘリウムの探索
- 1.4 宇宙線基礎データの精密測定

第 2 章 BESS 測定器

- 2.1 測定原理
- 2.2 BESS-TeV に向けた測定器の改良点
- 2.3 検出器
- 2.4 トリガーシステム
- 2.5 データ収集システム

第 3 章 データ収集システム

- 3.1 従来のデータ収集系
- 3.2 問題点
- 3.3 新しいデータ収集系

第 4 章 C-Bridge の開発

- 4.1 概要
 - 4.1.1 内部機能と動作
 - 4.1.2 内部構成
 - 4.1.3 環境開発
- 4.2 外部との通信
 - 4.2.1 通信の概観
 - 4.2.2 C-Bridge の常駐動作
 - 4.2.3 地上との通信動作
 - 4.2.4 モニタシステムとの通信動作
 - 4.2.5 イベント処理システムとの通信動作
 - 4.2.6 データ記録システムとの通信動作
 - 4.2.7 その他の動作

第 5 章 DAQ I/F の開発

- 5.1 構成
- 5.2 開発環境
- 5.3 内部動作

第 6 章 まとめ

- 6.1 動作テストと現状
- 6.2 将来計画

第 1 章 Introduction

BESS 実験 (Balloon-Borne Experiment with a Super-conducting Magnet Spectrometer) は、地上における加速器実験で培われた粒子測定技術を飛翔体検出器に応用することにより、過去の飛翔体検出器と比べて圧倒的な面積立体角と性能を有する気球搭載型超伝導スペクトロメータを開発・製作し、宇宙線反陽子、陽子・ヘリウムといった各種宇宙線の精密測定、反ヘリウムの探索等を行っている。1993 年の最初の打ち上げでは、初めて「質量の同定」という確実な方法で宇宙線反陽子を 4 例検出した ([1],[2],[3])。その後の改良を経てこれまでに 7 回 (1993-1995, 1997-2000) のフライトに成功しており、1000 例以上の宇宙線反陽子事象を検出している。

1.1 宇宙起源反陽子の探索

BESS 実験がこれまでに挙げた成果として最も重要なものとして宇宙線反陽子流束の精密測定がある。地球に降りそそぐ 1 次宇宙線の中には、その主成分である陽子やヘリウム核の他に微量の反陽子が含まれている。この反陽子は主に高エネルギー 1 次宇宙線陽子と星間物質の衝突により生成される 2 次起源反陽子だと考えられているが、この過程では 1GeV 以下の反陽子の生成確率は非常に低い。現在いくつかある宇宙線伝播モデルが予測する反陽子のエネルギー Spektrum は 2GeV 付近に鋭いピークを持ち、低エネルギーになるにつれて急激に減少している。BESS がこれまでに測定してきたデータはその 2 GeV 付近のピークを検出しており、観測された反陽子の大半は 2 次起源のものだといえる。しかし 1GeV 付近の低エネルギー領域に注目してみるとその反陽子数は予測値よりもやや多めであるかのようにとれなくもない。これが確実であるとすれば、宇宙線伝播モデルに修正を加えるか、あるいは別の起源の反陽子を求めなければならない。その起源として原始ブラックホールの蒸発 ([4])、超対称性粒子の対消滅 ([5]) といった興味深い現象が考えられている。

こういった宇宙起源反陽子の探索を目的とした低エネルギー反陽子の観測は、地磁気カットオフの高い低緯度では十分なデータが期待できない。そこで我々の実験では地磁気効果の小さい高緯度 (カナダ、リンレーク) にて低エネルギー反陽子の精密測定を行ってきた。地磁気カットオフは日本付近で約 10GV であるのに対して、ここでは約 0.4GV であり 1GeV 付近やそれ以下の低エネルギー反陽子の観測が可能である。図 1.1 にこれまでに得られた反陽子の観測データと超対称性粒子の対消滅、ブラックホールの蒸発から予測されるエネルギー Spektrum を示す。図を見てわかるように、低エネルギー領域の反陽子もいくらか観測しているが、そのデータ数はまだ不十分であり統計誤差が大きいため十分な検討ができない状況である。そこでカナダ北部における飛行時間 1 - 2 日間の観測から南極における 10 - 20 日間に延

長するという BESS-Polar 計画が考えられている。これにより現在の 10 倍以上のデータが得られるであろうと期待されている。

1.2 Solar Modulation の測定

BESS では太陽活動の極小期から極大期にわたる陽子・反陽子流束の経年変化も追っている。一般に、太陽系に入射した粒子は solar modulation と呼ばれる太陽磁場や太陽風の影響を受けるが、その影響は低エネルギーの宇宙線ほど大きい。太陽活動極小期では、大気頂上での流束が銀河間のものに最も近づくため、前述したような 1 次起源宇宙線の探索にとっても重要な意味を持つ。また太陽活動の活発化に伴う反陽子のスペクトラムの減少を観測することに成功しており、図 1.2 からその様子を確かめることができる。さらに Solar modulation は粒子の電荷に依存すると考えられており、反陽子/陽子比の経年変化を追うことによって、この効果を顕著に検証することができる。特に太陽の磁極が正から負に反転する太陽活動極大期では反陽子/陽子流束比が急激に増大するだろうと予想されている。BESS はこれまでの測定で太陽活動の極小期から極大期までの詳細な陽子・反陽子流束を得ることに成功している。図 1.2 にその反陽子/陽子流束比について示した。Solar modulation の電荷依存性を考慮に入れると、1990 年代の正磁極の期間は反陽子/陽子流束比はほとんど変動しないと予想されているが ([6])、観測データはほぼ同じ流束を示し、この予想と極めてよく一致している。一方、磁極が負方向に反転する 2000 年の太陽活動極大期に観測された結果ではその比が急激な上昇を示しており、予想された通りの反陽子/陽子流束比を得ている。このことから solar modulation の電荷依存性についての決定的な証拠を提示した。また、これらデータの経年変化は solar modulation のモデルをより深く研究する上で非常に重要なデータとなることが期待される。

1.3 反ヘリウムの探索

一般的には初期宇宙に起こった物質・反物質の対称性の破れにより、現在我々の知る宇宙は物質優勢であると考えられている。しかしその詳細は明らかではなく、反物質だけから成る領域が超銀河団以上離れた場所に存在し、そこから漏れ出す反陽子や反ヘリウム等の一部が我々の銀河に到来して、極微量、宇宙線に混入して地球に降りそそぐ可能性も完全には否定しきれない。反陽子の測定においては前述したような生成過程も考えられるため、観測がそのまま反物質領域の存在には結びつかない。それに対して、反ヘリウムは宇宙線と星間物質や大気との衝突によって二次的に生成される確率が非常に低いため、その測定が直接反物質領域の存在を示唆することになる。図 1.3 に示すように、これまでの BESS 実験ではヘリウムに対する反ヘリウムの存在比の上限として、 7×10^{-7} が得られている。この探索結果は、我々の回りの銀河が物質で構成されていることに対する最も直接的な証拠であるが、

さらに高感度な測定によって、より広い領域での検証が可能である。BESS-Polar 計画では、 10^{-7} 以下の感度を目標とした反ヘリウム探索を目指している。

1.4 宇宙線基礎データの精密測定

陽子やヘリウムは一次宇宙線の主成分であり、それらのエネルギースペクトラムや絶対流束は宇宙線の基礎データとされている。特に大気ニュートリノの研究に対して、これらの絶対流束は非常に重要なデータとなる。最近 Super-Kamiokande でのニュートリノの観測により、大気ミュオンニュートリノの天頂角分布異常が発見された。このことからニュートリノ振動の証拠を得て、ニュートリノに質量があると示唆されている ([7]) が、この実験では大気ニュートリノフラックスの絶対値は用いずに、 ν_e/ν_μ の理論と実験の比を元に解析を行っている ([8])。これは大気ニュートリノの親となる一次宇宙線のスペクトラムに残された不確定性によるものである。現在まで一次宇宙線のエネルギースペクトラムは様々な実験で観測されてきた ([9],[10],[11],[12],[13],[14]) が、これらの結果は 50GeV で最大 2 倍の不一致があった。

BESS では 1998 年のフライトにおいて、測定エネルギー領域を広げた改良を行い、統計量の少なかった高エネルギー陽子の詳細なスペクトルを得た ([15])。これにより 1 ~ 120GeV 付近の陽子スペクトルを明らかとなり Super-Kamiokande でいう「fully-contained events」に相当する ~ 10GeV のニュートリノフラックスに対して重要なデータとなっている。Super-Kamiokande で可能な測定領域は ~ 100GeV であることから、今後大気ニュートリノを研究していくためには、およそ 1 TeV までの一次宇宙線スペクトラムが必要不可欠である。

この領域のデータはカロリメーターを使った実験で測定されている ([9],[10]) が、エネルギーの絶対値の測定には誤差が大きく、スペクトラムの絶対値を決めるのは難しかった。絶対値を決めるにはスペクトロメーターが最も適しており、実績のある BESS 測定器に改良を施し、さらに「partially-contained events」、「upward through-going muons」、「upward stopping muons」に分類されるニュートリノに対する絶対フラックスの計算に必要な一次宇宙線のスペクトラムを詳細に測定するという BESS-TeV 実験が計画された。これは 2001 年の 8 月 ~ 10 月にかけて、アメリカ(ニューメキシコ州、フォートサムナー)において実地され、気球上昇中と高度 37km 付近(残留大気約 $5\text{g}/\text{cm}^2$)での観測を行った。上昇中のデータ収集は大気ニュートリノ流束の計算を行う上で非常に有益なデータとなる。また、この場所は標高が 1500m と高いところに位置したため、地上での観測も行っている。図 1.4 に BESS-TeV で予想される陽子のスペクトルを示す。さらに、地磁気カットオフが約 4GV であり、観測されるであろう 4GeV 以下の陽子、反陽子のほとんどが大気中で生成されたものであると予想されるため、これまでに得られたこれら観測データの不定性を減らす上で貴重なデータとなる。

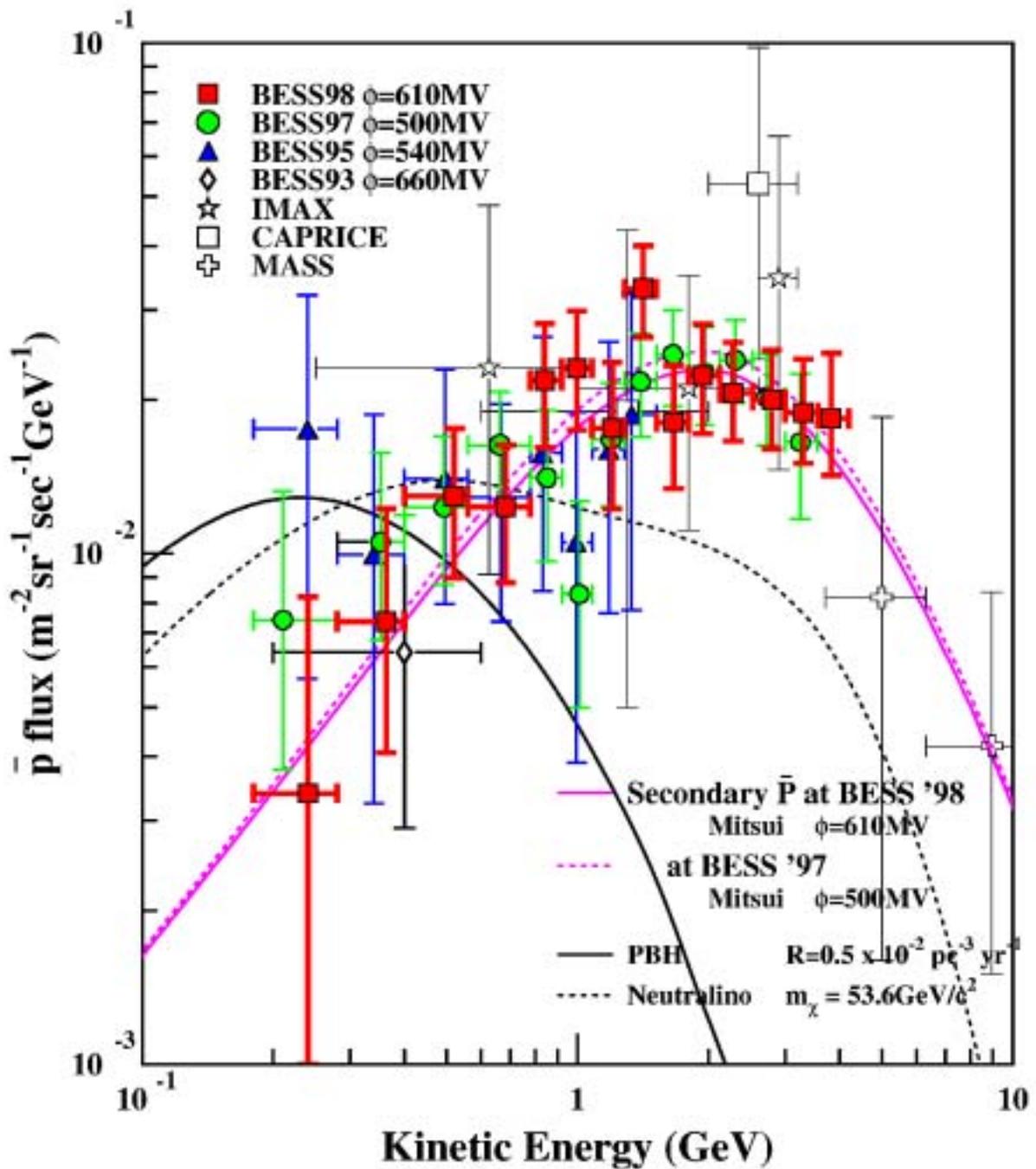


図 1.1 BESS で得られた反陽子スペクトラム

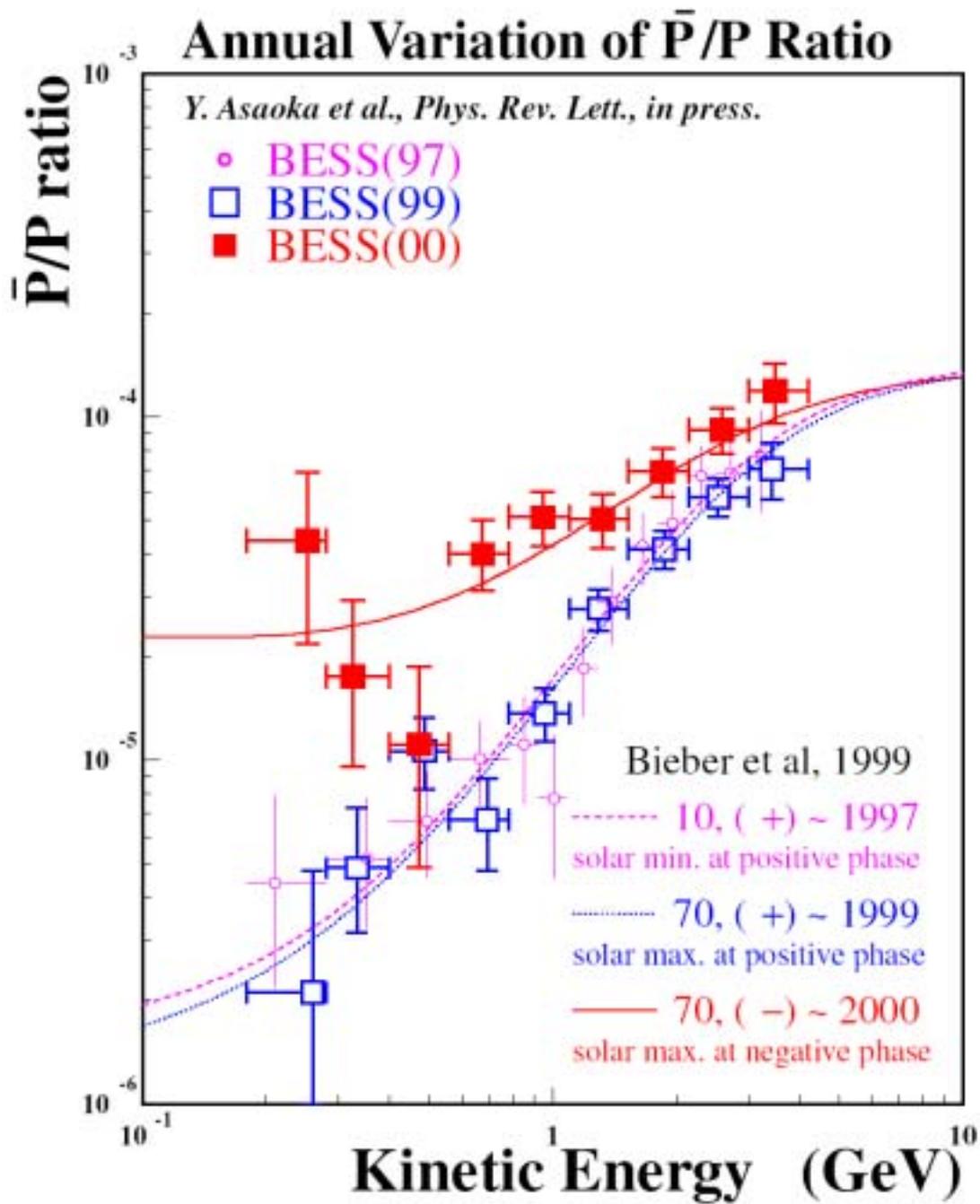


図 1.2 太陽磁場極性反転前後における反陽子/陽子流束比

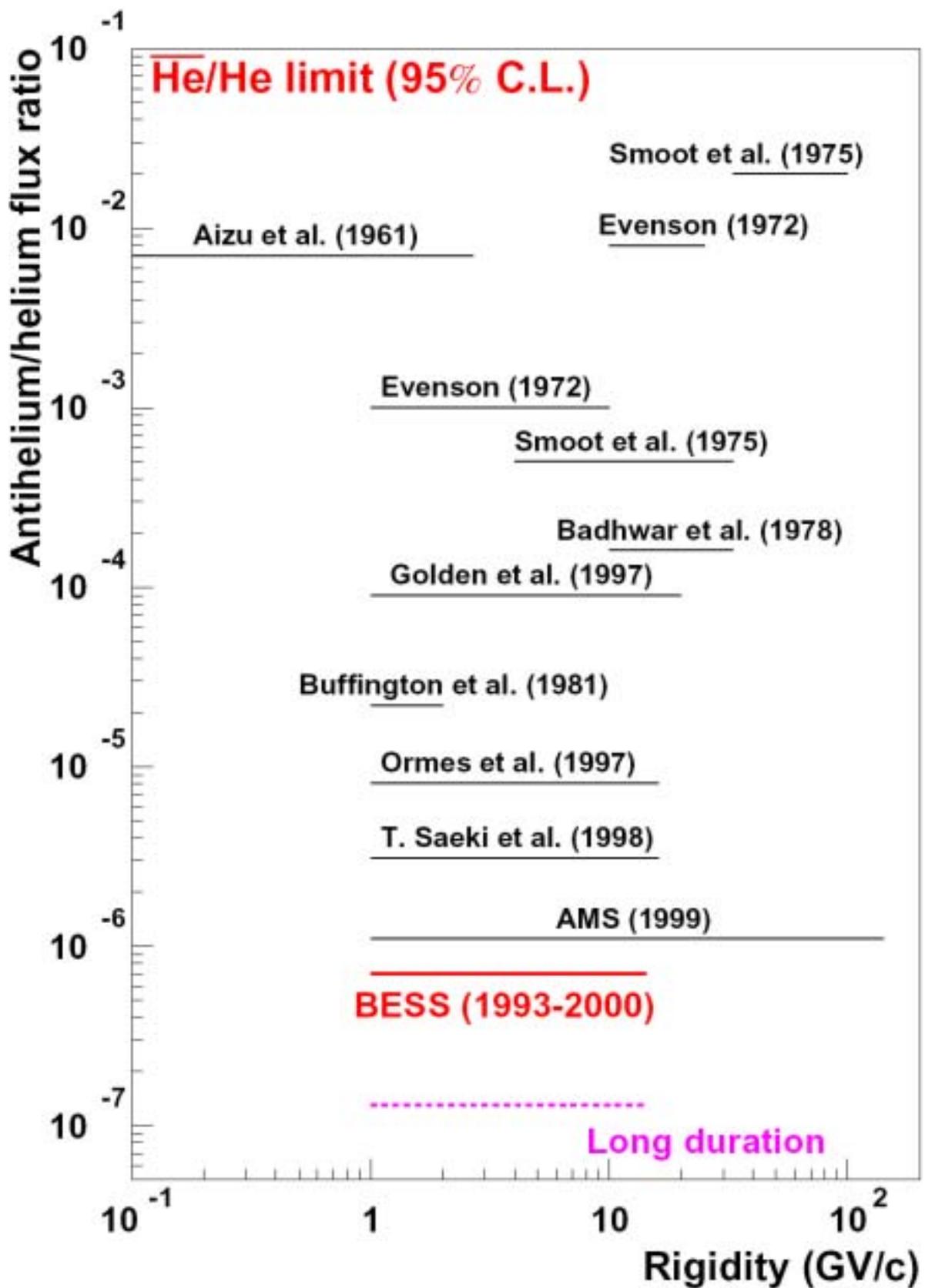


図 1.3 ヘリウムに対する反ヘリウムの流束比

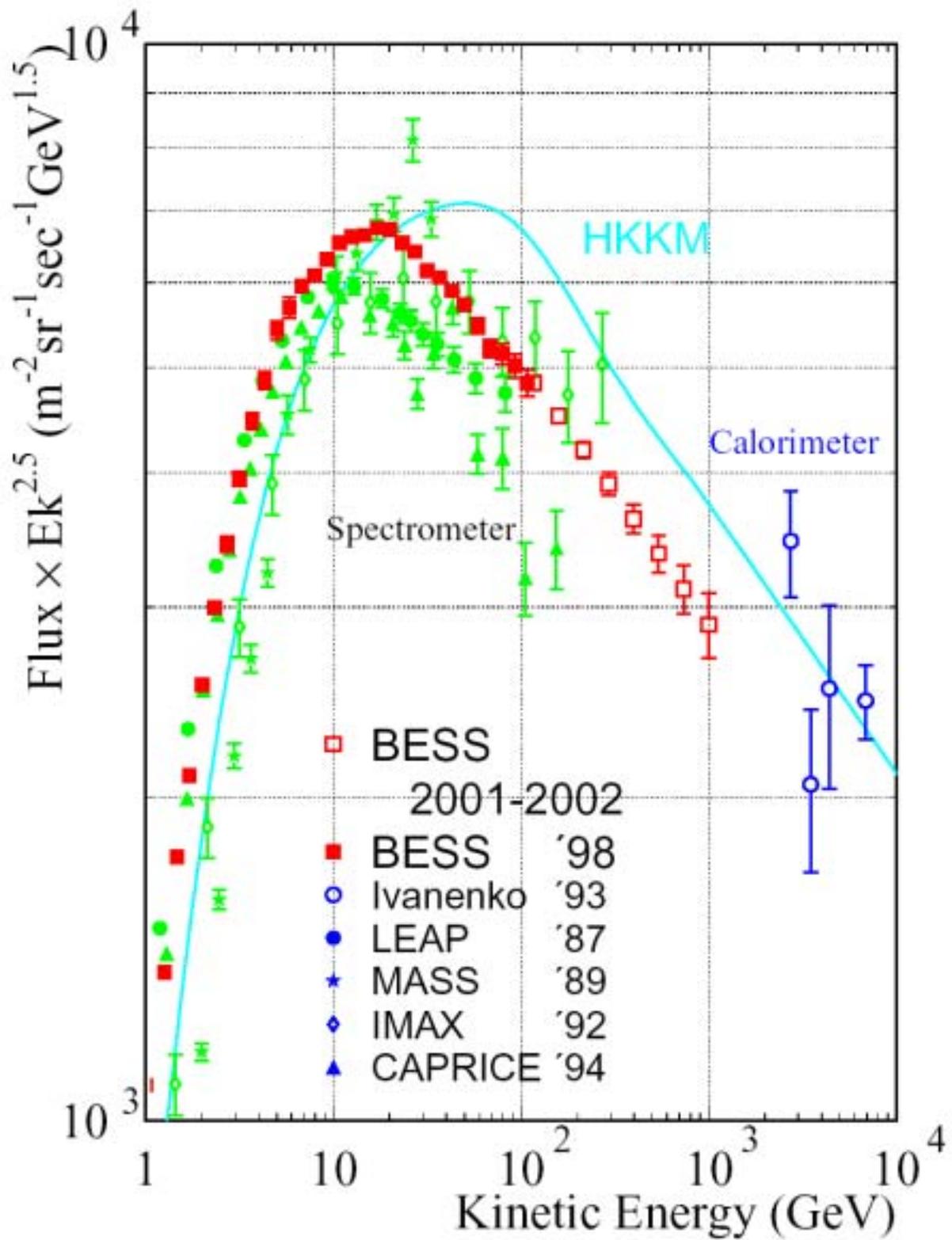


図 1.4 BESS-TeV(2001-2002)で予想される陽子のスペクトラム

第2章 BESS 測定器

BESS 測定器は、Jet-type Drift Chamber (JET)、Inner Drift chamber (IDC)、超伝導ソレノイド、time of flight counter (TOF)、Aerogel Cherenkov Counter (AEROGEL)で構成された、気球搭載型超伝導スペクトロメータである ([16],[17],[18])。図 2.1 に 2000 年のフライトでの BESS 測定器の断面図を示す。

2.1 測定原理

BESS 実験では粒子の質量を測定することにより粒子の識別を行っている。相対性理論によれば、粒子の速度と運動量の間には関係式 $p = pc/(p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2}$ が成り立つことから、粒子の速度と運動量を測定すれば質量が決定できる。また、磁場中で電荷 Z を持つ荷電粒子が通過するとローレンツ力が働き、その粒子は曲げられて半径 $r = pc/ZeB$ の軌跡を描く。BESS 測定器には超伝導ソレノイドが載っており、内部では 1 T の均一磁場がある。これにより入射荷電粒子を曲げ、JET チェンバーと IDC において飛跡の測定がなされる。最外層には TOF カウンターが配置されていて、粒子の速度を測定している。さらに JET チェンバーと TOF カウンターの dE/dx から粒子の電荷の大きさ $|Z|$ がわかるので、 $1/p$ と Rigidity 平面にプロットすると図 2.2 のように質量 m をパラメータとしてバンドを形成する。

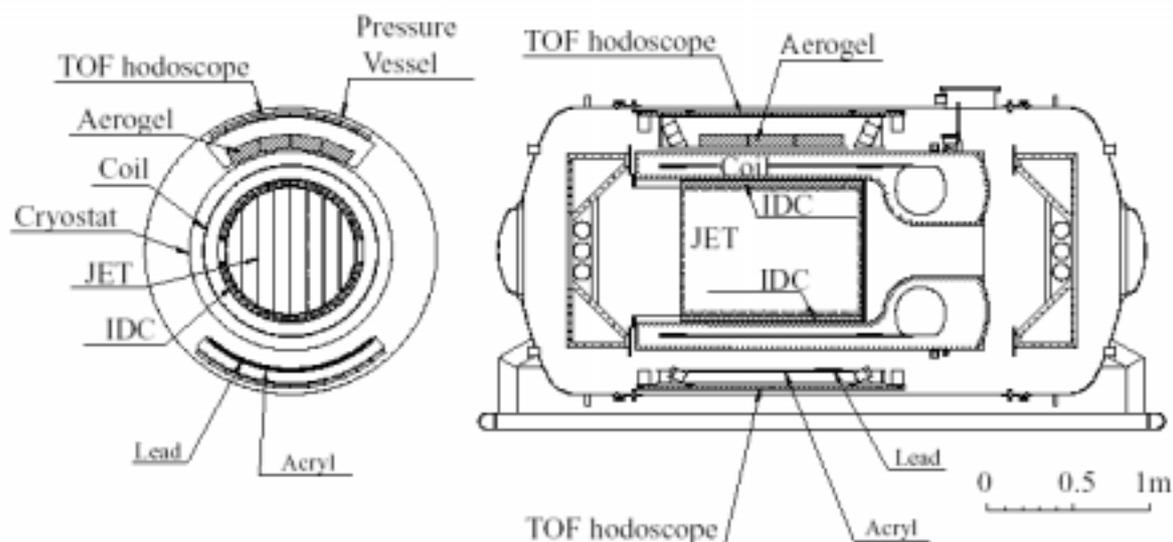


図 2.1 BESS2000 における測定器の断面図

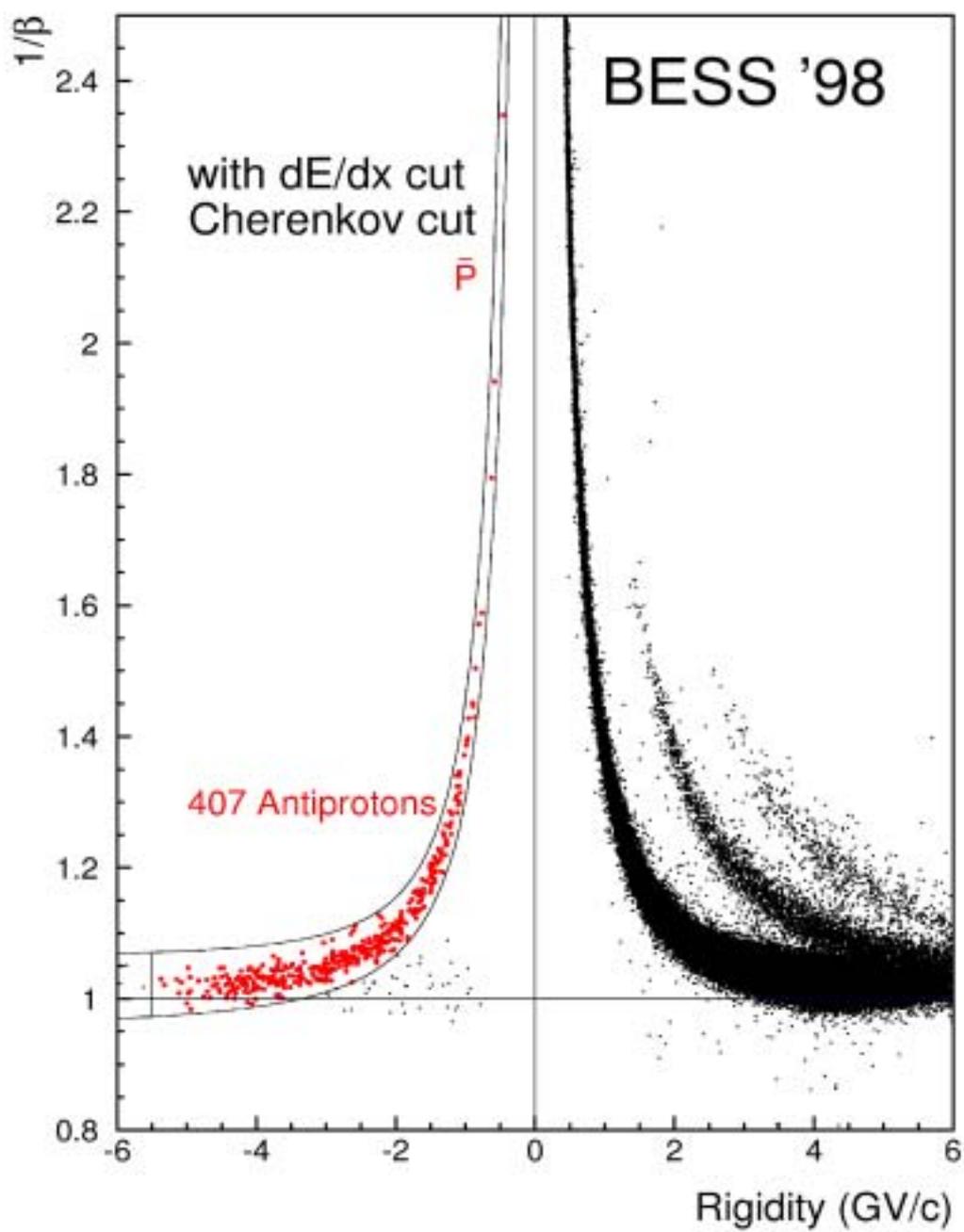


図 2.2 反陽子の $1/\beta$ と Rigidity 平面プロット(質量の同定)

2.2 BESS-TeV に向けた測定器の改良点

BESS-TeV ではより高い運動量測定を目指し、測定器に改良を加えなければならない。一様な磁場中での運動量 p の分解能は、

$$\frac{\rho}{p^2} \frac{1}{\sqrt{N+4}} \frac{1}{L^2} \quad \text{:測定点の分解能} \quad N\text{:測定点数} \quad L\text{:測定されたトラックの path length}$$

と表されることから、以下の点の改良を目指した。

トラックの path length L を長くする

BESS 測定器の最外層に新しくドリフトチェンバー (ODC) を導入することによって、トラックの path length を現在の約 2 倍にする。

位置分解能 を小さくする

現在使われている JET-type drift chamber (JET) と Inner Drift Chamber (IDC) をより位置分解能の高い新しいものと置き換える。

測定点数 N を増やす

新しい DAQ システムを開発し、ODC、JET、IDC をまとめたトラッキングシステム全体での測定点数を現在の約 2 倍に増やす。

図 2.3 に改良前後の BESS 測定器の断面図を示す。改良に向けて BESS2000 と BESS-TeV 測定器についての簡単なシミュレーションを用いてその性能評価が行われた。一定の運動量のトラックを作り、測定される点を位置分解能の分だけ振らせる。これによって得られた点を測定点とし、計算される運動量のばらつきを測定器全体の運動量分解能として評価した。図 2.4 にその結果を示す。運動量と運動量のばらつきが等しくなる点 ($p/p=1$) を測定可能な最大運動量 MDM (Max Detectable Momentum) とした。BESS2000 では $MDM=220\text{GeV}/c$ という値が得られ、この数値は実際の測定データとも一致している。一方、BESS-TeV では $MDM=1480\text{GeV}/c$ となり、このシミュレーションからは改良により十分な性能が得られることが評価されている。さらに、multiple scattering の影響を見積った運動量分解能の評価もなされており、この結果を図 2.5 に示す。ODC、JET、IDC の全てを用いてトラッキングを行った場合と ODC を用いずに行った場合のそれぞれの運動量分解能と multiple scattering の効果がプロットしてある。測定器の最外層に配置してある ODC を用いてトラッキングした場合トラック中で超伝導マグネットを通過するため、その物質質量での multiple scattering による運動量分解量の悪化が大きくなってしまふ。これは高エネルギー側では無視できるが、5GeV 以下の低エネルギー側では、ODC の位置分解能より超伝導マグネットでの multiple scattering の方が大きいので、ODC を使わずに運動量を求める。これにより約 0.1GeV まで高い運動量分解能での測定が可能である。

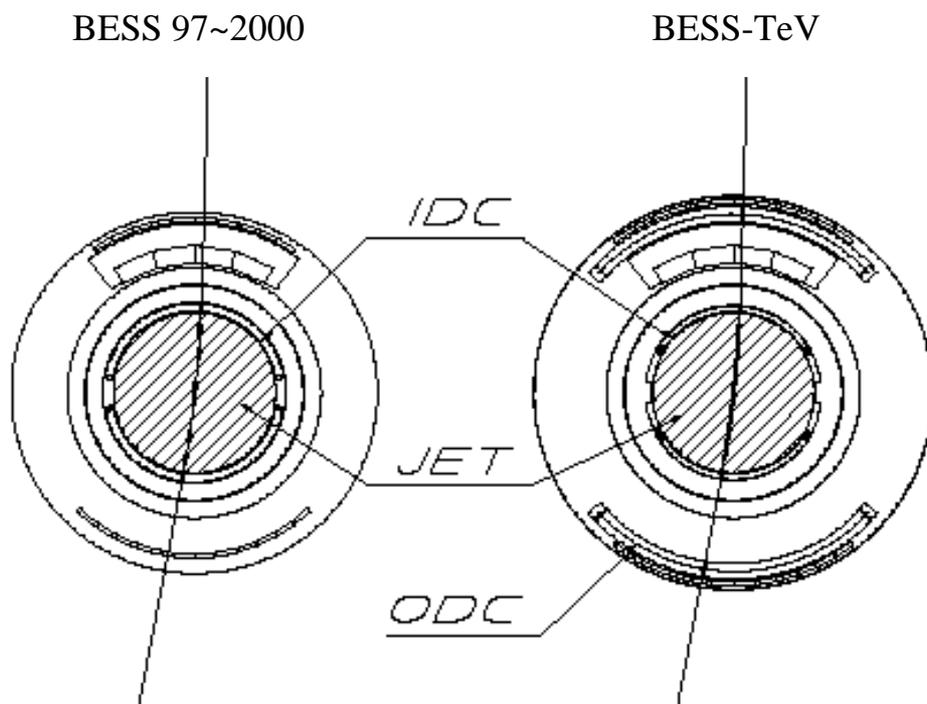
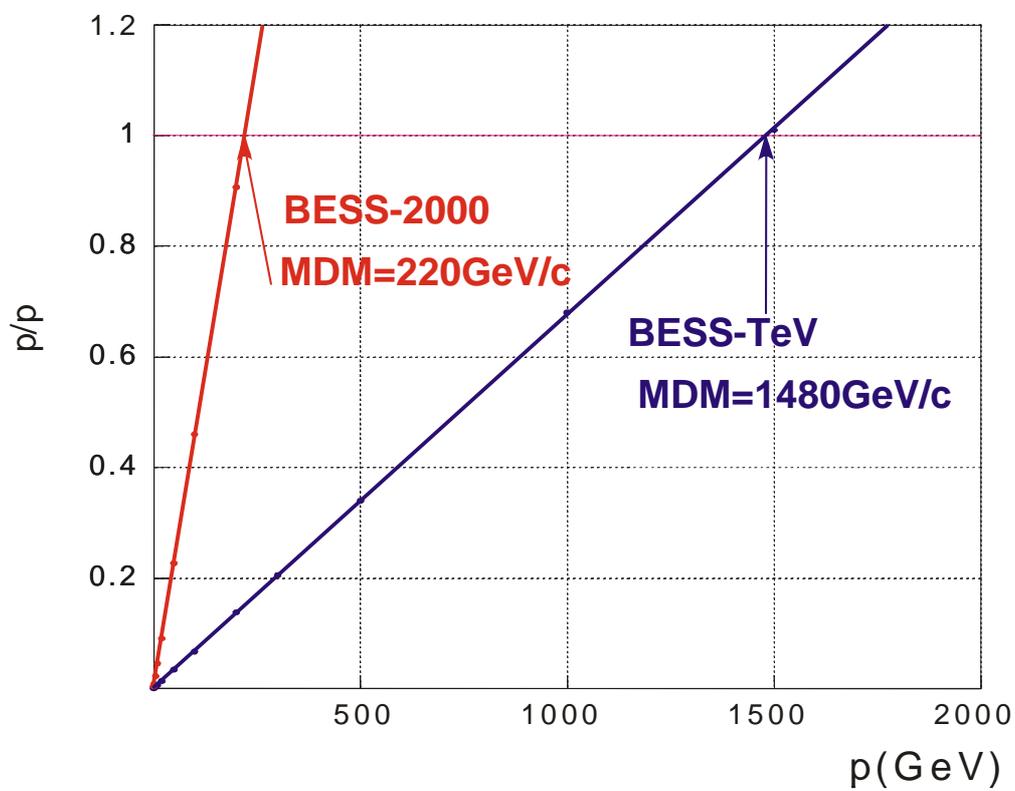


図 2.3 : BESS 測定器の改良前後の断面図



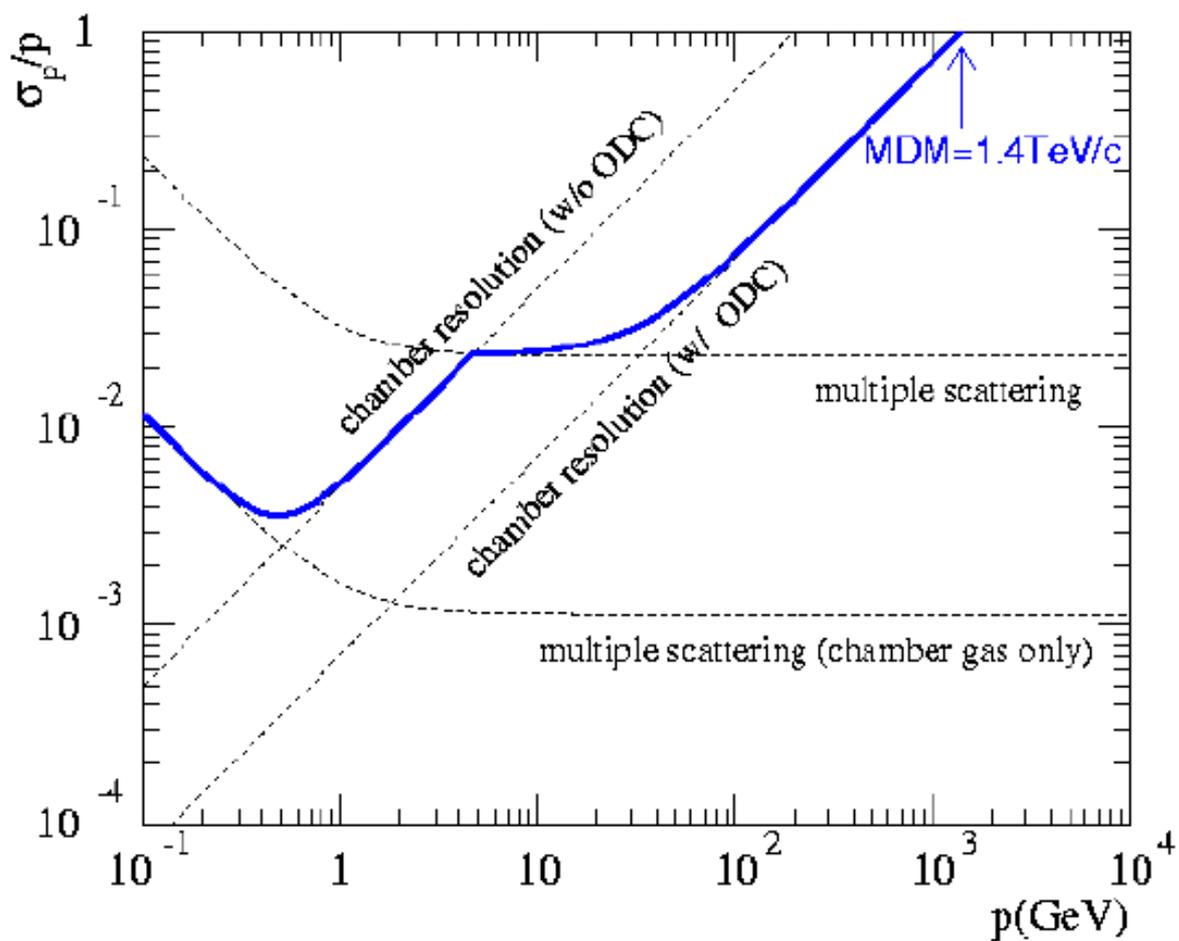


図 2.4 : multiple scattering 効果を考慮した運動量分解能評価

2.3 検出器

・超伝導ソレノイド

超伝導材を用いた薄肉ソレノイド電磁石であり、測定器の中央に置かれている。直径 1m、長さ 1m で、1 テスラの均一な磁場を作ることができる。磁場のばらつきは典型的な入射粒子の軌跡では 2.5%以下である。低エネルギー反陽子の測定のために粒子の透過率が高くなるよう、サポートをアルミハニカムで作っており、物質量は 4.7g/cm^2 ($0.22X_0$) /wall となっている。

・JET、IDC

ソレノイドの内側には円筒形の JET セル型ドリフトチェンバー (JET) と、円弧状の Inner Drift chamber (IDC) が配置されており、ソレノイドで曲げられた粒子の軌跡を最大 28 点で測定し、そのフィットパターンから magnetic rigidity ($R = pc/Ze$) を求めている。JET、IDC の位置分解能はそれぞれ、 $175\ \mu\text{m}$ 、 $220\ \mu\text{m}$ であるが、改良後の新しい JET、IDC ではそれぞれ、 $150\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ となるとともに、JET の読み出し可能点数は 48 となる。現在の JET、IDC は別々に作られたものをインストールの段階で組み立てているが、これだと JET、IDC の位置関係に不定性が残ってしまうので、キャリブレーションがうまくいかないことがある。しかし、改良後の JET、IDC ではエンドプレートを一体化させることによって位置関係を明確にし、相互キャリブレーションで生じる不定性を減らすことで、IDC の位置分解能を向上させている。図 2.4 に改良後の JET、IDC を示す。

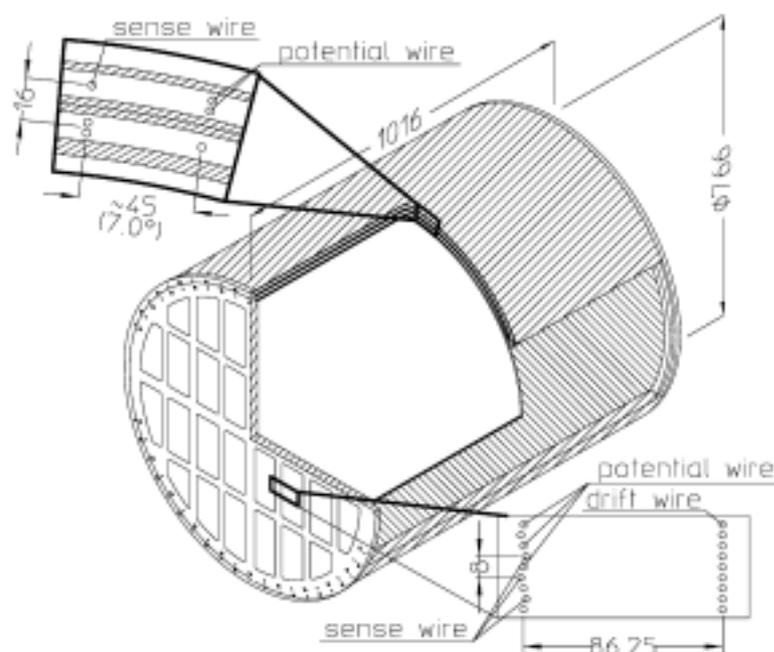


図 2.4 改良後の JET、IDC チェンバー

・ ODC

pass length を 2 倍にするために今回新たに搭載され、TOF カウンターの内側に置かれている。前述した式から明らかなように、これによって運動量分解能を 4 倍に向上することができる。厚さ 70mm 足らずの領域に 4 層の sensitive plane を配置した円弧状の構造となっている。物質量は最大でも上下 2 台分で $1\text{g}/\text{cm}^2$ 以下であり、位置分解能は約 $150\ \mu\text{m}$ である ([19])。図 2.5 に ODC の構造を示す。

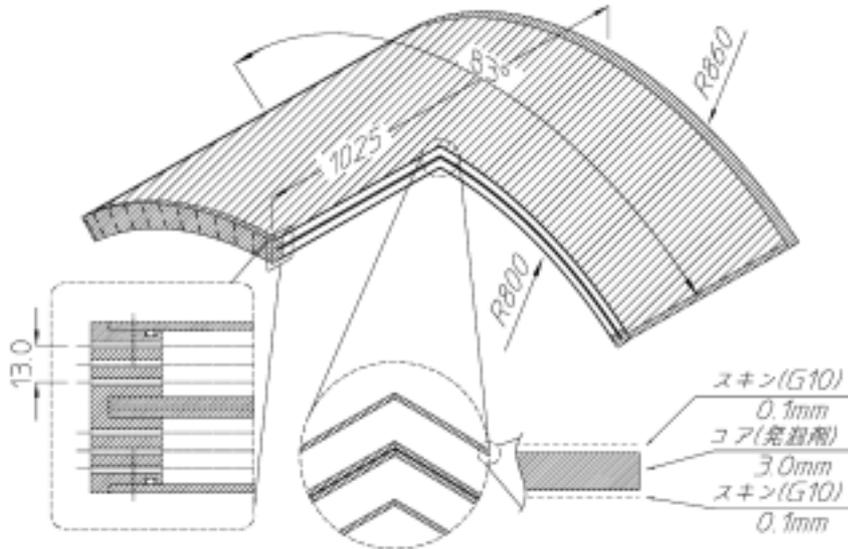


図 2.5 ODC チェンバー

・ TOF カウンター

time-of-flight (TOF) カウンターは圧力容器の最も外側にあり、上部に 10 枚、下部に 12 枚配置されている。個々のカウンターは $95 \times 10 \times 2\text{cm}^3$ のプラスチックシンチレーターからなり、ライトガイドを通して両側の PMT で読み出している ([20])。これを図 2.6 に示す。TOF カウンターは入射粒子の速度 ($\beta = v/c$) とエネルギー損失 (dE/dx) を測定しており、時間分解能は全体として 75ps である。

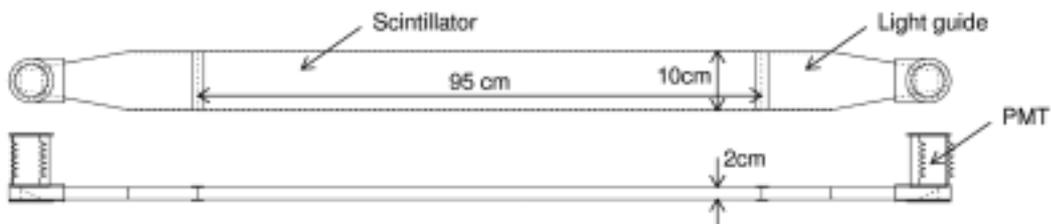


図 2.6 TOF カウンター

• Aerogel チェレンコフカウンター

屈折率が約 1.02 のシリカエアロジェルを媒体に用いたチェレンコフカウンターで、上層の ODC の下に配置される ([21])。30×20×2cm³ のシリカエアロジェルが 4 枚重ねを 1 組として敷き詰められている。両側には合計 46 本の PMT が取り付けられている。このチェレンコフカウンターはスレッシュホールド型で反陽子が光り始める運動エネルギーの 3.6GeV 以下までは、チェレンコフ光の有無により反陽子とそのバックグラウンドである π^- 、 μ^- 、 e^- との識別が可能となっている。図 2.7 にその構造を示す。

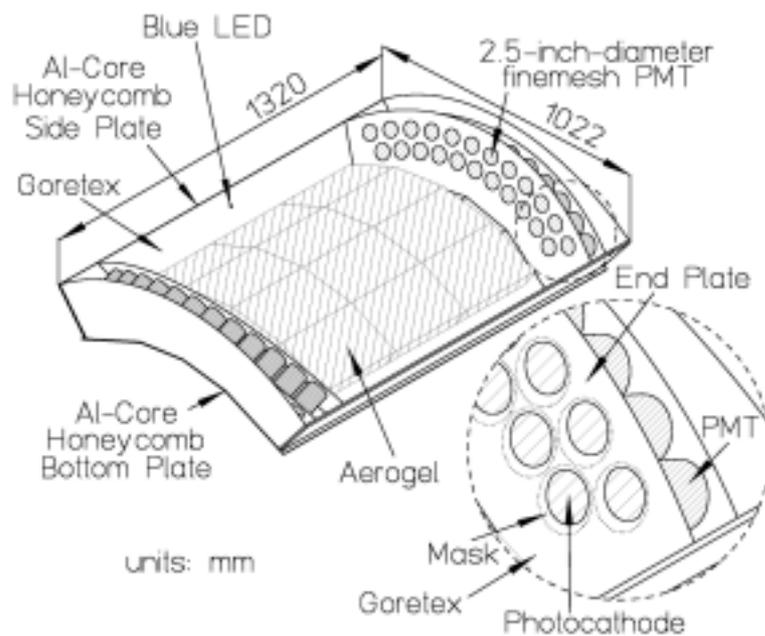


図 2.7 Aerogel チェレンコフカウンター

2.4 トリガーシステム

粒子の入射を検出し、そのイベントを受け入れる (Accept) か、あるいは棄却する (Reject) か、をデータ収集システムに伝えるのがこのトリガーシステムである。図 2.8 にトリガーシステムの概要を示す。BESS 測定器のトリガーシステムは 2 段構造になっている。まず最初に、上下の TOF カウンターの反応により、トリガーモジュールが first-level トリガーである T0 トリガーを出力する。Flight 中での T0 トリガーの頻度は約 2kHz である。T0 トリガーを受けると、BESS 測定器のデータ収集システムは各検出器のデータ収集を開始する。

T0 トリガーが発生すると、トラック・トリガー・モジュールは TOF と IDC の情報からこのイベントを受け入れるかどうかを判断する。その結果はマスター・トリガー・モジュールに渡され。マスター・トリガー・モジュールはトラック・トリガー・モジュールからの情報と Aerogel からの情報とを合わせて、Accept か Reject かを決定する。

マスター・トリガーが入射粒子のデータを記録すると判断した場合は Accept 信号が発生し、T0 トリガーにより開始されたデータの収集はそのまま続行される。逆に入射粒子のデータを棄却すると判断した場合は Reject 信号が発生し、データ収集は直ちに中断されてシステムはクリアされる。その後、T0 トリガーが発生する前の状態に戻る。

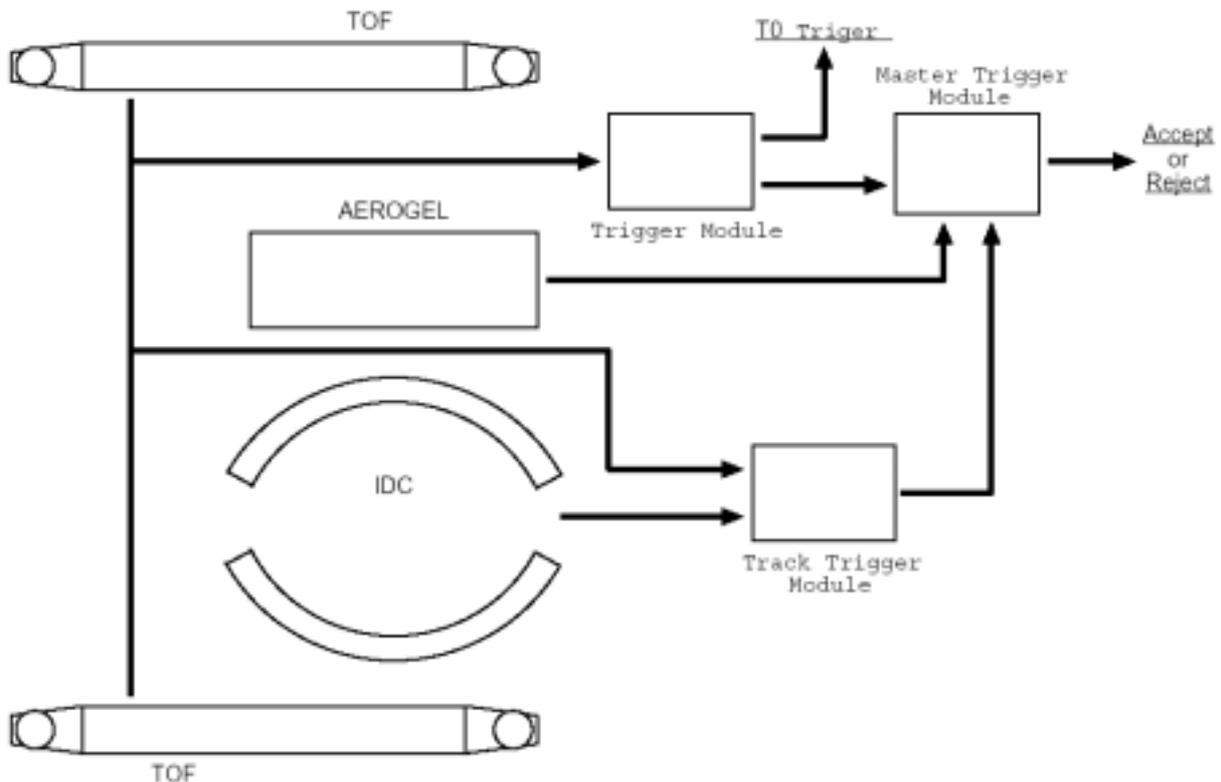


図 2.8 Trigger システム

2.5 データ収集システム

BESS に粒子が入射したときに各検出器が出力するアナログ信号は、FADC クレートのモジュールと CAMAC クレートのモジュールにより適切なデジタル信号に変換される。JET と IDC の出力するアナログ信号は、FADC クレート内の FADC システムによりデジタルの時刻と波高の情報に変換された後、データ量削減のために圧縮される。それ以外の検出器の出力は、CAMAC クレート内の TDC モジュールと ADC モジュールによりデジタル情報に変換される。

デジタル化されたこれらの情報はイベント・ビルダーによって収集され、1 つのイベント・データとしてまとめられる。その後イベント・フィルターへと送られ、トリガーシステムよりもさらに高度で柔軟なイベント取捨選択の判断をオンラインで行い、最終的に選択されたデータのみが磁気テープに記録され保存される。

FADC に関しては現在改良中である ([22],[23])。BESS 全体の消費電力は約 1.2kW であるのに対して、現在の FADC の消費電力は約 300W であり、全体の 1/4 を占めている。また、新たにチェンバーが追加され読み出しチャンネルが 2 倍近く増える。現在のものを 2 台搭載するのは電力・スペースの点で不可能であるため、新しく開発する必要がある。改良後の FADC では 1 チャンネル当たりの消費電力が現在の 1/2 から 1/3 程度になる予定である。

また、3 台のドリフトチェンバーを新しく製作するので、それに取り付ける pre-amp も新たに開発する必要がある。開発期間の問題から Fermilab の CDF バーテックスチェンバーに使われていた pre-amp のベアチップが採用された。現在の BESS で使われている Fujitsu MB43458 の後継機であり、高ゲインと、低消費電力、低ノイズ、軽量が特徴となっている ([24])。電流 - 電圧の実測値は 15.7mV/ μ A であり、現行の MB43458 のゲインである 7.2mV/ μ A の 2 倍となっている。

BESS のデータ収集システム内のネットワークは今年新たに改良された。本論文ではこのデータ収集システム内の構成について詳しく説明する。旧システムと新システムの概観については 3 章、新システムの詳細については 4 章、5 章で参照されたい。

第3章 データ収集システム

気球に搭載された測定器のデータ収集システムを地上から制御するためには、無線通信を行う必要がある。この通信により、システム制御のコマンドの発行、システムの状態の確認、各検出器の状態の確認等を行う。また、収集したイベントを毎回地上に送って記録するのではテレメトリーによる制限から効率的ではないため、磁気テープを搭載し、そこに収集データを蓄積する。その他、気球搭載用であることから電源には電池を用いることになる。そのため使用できる電力に制限が課せられるので、低消費電力化が必要とされる。

3.1 従来のデータ収集系

BESS のデータ収集システムは 1988 年から出発し現在までに様々な経緯を経てきた。特に 1988 年 6 月にカナダでのフライトに向けた予備実験として日本（岩手県三陸）で実地されたフライトでは 1CPU による集中型制御システムであったが、翌年 9 月に行われた 2 回目の予備実験では 3CPU で構成された分散型制御システムに変更された。システム全体を 1 つのユニットとして開発した場合、システムが複雑化し、メンテナンスも困難になることが予想される。一方でシステムを分割することにより、分割された各部分を特定の機能を持つ 1 つのユニットとして開発することができ、システム内の処理を分散できるためそれぞれの処理が簡素化・高速化し、負担が軽減するといったメリットがある。

1991 以降の BESS のデータ収集システムでは主に 4 つのサブシステムに分かれており、各サブシステム間は Local Area Network (LAN) で結ばれている。また、そのネットワークプロトコルとしては omninet が採用されている。4 つのサブシステムはそれぞれ

・ コミュニケーション・サブシステム	地上との交信処理
・ モニタ・サブシステム	測定器およびその周辺環境を監視
・ イベント・サブシステム	測定器からのデータを収集、処理
・ ストレージ・サブシステム	データ記録装置を制御

からなっている。

これらは 1 サブシステムに 1CPU (NEC V40,V50) といったコンピュータ・システムで分散制御型のネットワークをとることによって、前述したような処理の高速化、CPU の負担削減、メンテナンスの効率化を図っている ([25])。図 3.1 に従来のデータ収集システムの概観を示す。

地上側のコンピュータとの通信は米国 NSBF (National Scientific Balloon Facility) の気球搭載用統合装置 CIP (Consolidated Instrument Package) と呼ばれる通信用ユニット

を介して行われる。CIP は地上から受信したデータをパラレル・データとして出力し、地上へ送信するデータをシリアル・データとして入力する。

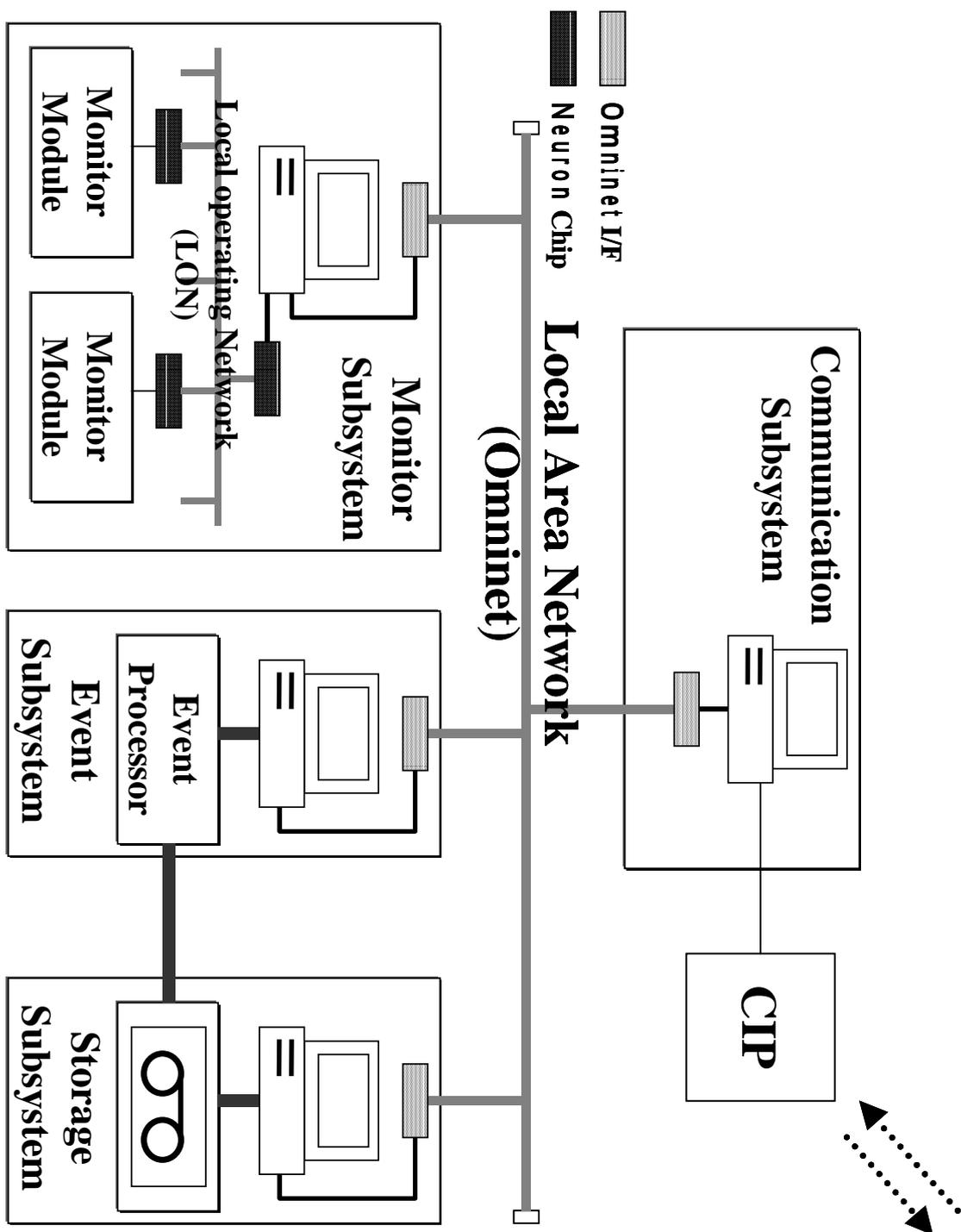


図 3.1 従来のデータ収集システムの概観

各サブシステムは 1 ボード 1 機能といったいくつかのボードから構成され、クレート内に収められている。以下に各サブシステムの機能について記す。

コミュニケーション・サブシステム

主に地上との交信を行い、地上からのコマンドを各サブシステムに伝達、各サブシステムからのメッセージ・データ等の情報を地上へ送信する等の処理を行う。

V40 を搭載した CPU ボード、256Kbytes までのメモリを装備できるメモリ・ボード、システム全体の時刻の基準となるリアルタイム・クロック・ボード、ネットワーク通信の自動制御を行う Omninet コントロール・ボード、シリアル通信コントローラを搭載した送信コントロール・ボード、パラレル通信コントローラを搭載した受信コントロール・ボードなどが組み込まれている。また、このサブシステムと CIP の間では必ず電氣的に絶縁されるようになっており、フォトプラを装備した絶縁ボードも組み込まれている。

モニタ・サブシステム

測定器およびその周辺の状態を監視し、その情報を Omninet を通じてコミュニケーション・サブシステム、ストレージ・サブシステムに送信している。

V40搭載のCPUボード、メモリ・ボード、Omninetコントロール・ボードなどで構成されており、モニタ装置としては、各部温度や圧力磁場などを測定する汎用モニタ (64ch) を1台、H.V.専用モニタ (56ch) を3台、Vessel外部で残留大気圧や外気温を測るための小型ユニットを1台、GPSの出力するRS-232Cレベルのデジタル信号を解釈するユニットを1台、合計6台を備えている。これらモニタは米国Echelon社のLON (Local Operating Network) と呼ばれるネットワークによって接続されている。1ch当たりの消費電力は10mWと非常に低いのが特徴である。

LONは国際標準機構ISOにおけるOSI (Open System Interconnection) の7層すべてをサポートしているLon Talkと呼ばれる通信プロトコルを基に作り上げられたネットワークシステムで、専用のマイコンであるニューロン・チップを使用した知的分散制御型ネットワークである。各モニタにはニューロン・チップが組み込まれており、収集したデータをネットワークに流す。一方CPU側では、バス接続されたニューロン・チップから受け取ったデータに一連の処理をし、他のサブシステムに送信する。モニタの制御は全てニューロン・チップが実行するため、CPUとしてはコミュニケーション・サブシステムより受け取ったコマンドを処理し、必要であればニューロン・チップへ送信する事と、収集したモニタ・データを他のサブシステムへ送信することが主な動作となり、それほど複雑な処理を必要としない。図3.3にモニタ・サブシステムの構成を示す。

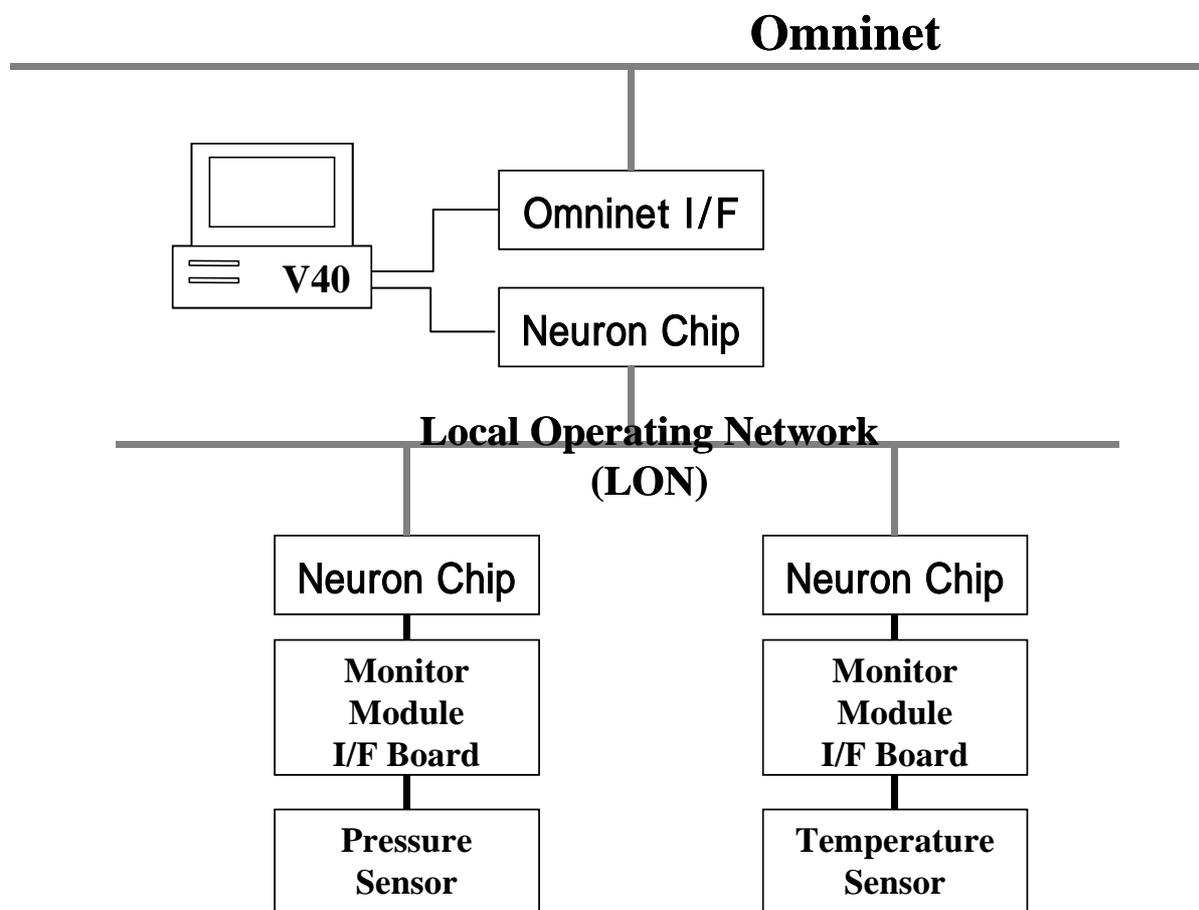


図 3.2 モニタ・サブシステム

イベント・サブシステム

測定器からのデータの読み出し、削減、圧縮を行うモジュールで構成された FADC クレートや CAMAC クレート、そしてイベントの構築、識別を高速に行う Event Builder や Transputer Bank、またそれらを監視、制御するモジュール群から構成される ([26])。各クレートからのデータは Event Builder により、それぞれ平行して独立に読み出された後、内部でイベントの構築が行われる。Event Builder はトランスピュータと呼ばれる並列処理型マイクロプロセッサを用いることによりデータの入出力をスムーズに行っている。このトランスピュータはシリアル・リンクという通信ポートを 4 つ備えており、他のトランスピュータと接続してネットワークを形成することができる。構築されたイベントはシリアル・リンクを通じて Transputer Bank へ送られイベントの取捨選択がリアルタイムで行われる。Transputer Bank は複数のトランスピュータからなるプロセッサ群であり、内部はシリアル・リンクによるトランスピュータ・ネットワークが組まれている。各トランスピュータが同一のプログラムを走らせ、各々が 1 イベントずつ処理を行い、最終的に選択されたイベントはシリアル・リンクによりストレージ・サブシステムへと転送される。これらモジュールの監視、制御を行うモジュール群は V50 を搭載した CPU ボード、メモリ・ボード、Ominet コントローラ、トランスピュータ・シリアル・リンク・インターフェイス等で構成される。ここでの CPU の動作は主にコマンドやメッセージを扱うだけである。

ストレージ・サブシステム

地上からのコマンドに応じて記録装置を制御し、またイベント・サブシステムから送られてくるイベント・データ、モニタ・サブシステムから送られてくるモニタ・データ、コミュニケーション・サブシステムから送られてくる地上からのコマンドのログを記録装置に蓄積する。

V50 を搭載した CPU ボード、メモリ・ボード、Ominet コントローラ、トランスピュータ・シリアル・リンク・インターフェイスなどから構成される。記録装置としては 8mm カートリッジ・テープ記録装置 EXB-8500 を 2 台用いる。これは SCSI 規格に基づいており、1 台当たり約 5 GBytes の記録容量を持っている。V50 はトランスピュータ・シリアルリンク・インターフェイスを介してトランスピュータと通信を行い、他のシステムから送られてくるコマンドやデータをトランスピュータ・ネットワークに送り出す。トランスピュータはこれらコマンドを実行し、あるいは受け取ったデータを SCSI 制御用のトランスピュータ・モジュールに送る。このモジュールは SCSI バスの制御を自動的に行い、データの書き込み、SCSI コマンドの処理をする。図 3.3 にイベント・サブシステムとストレージ・サブシステムの概観を示す。

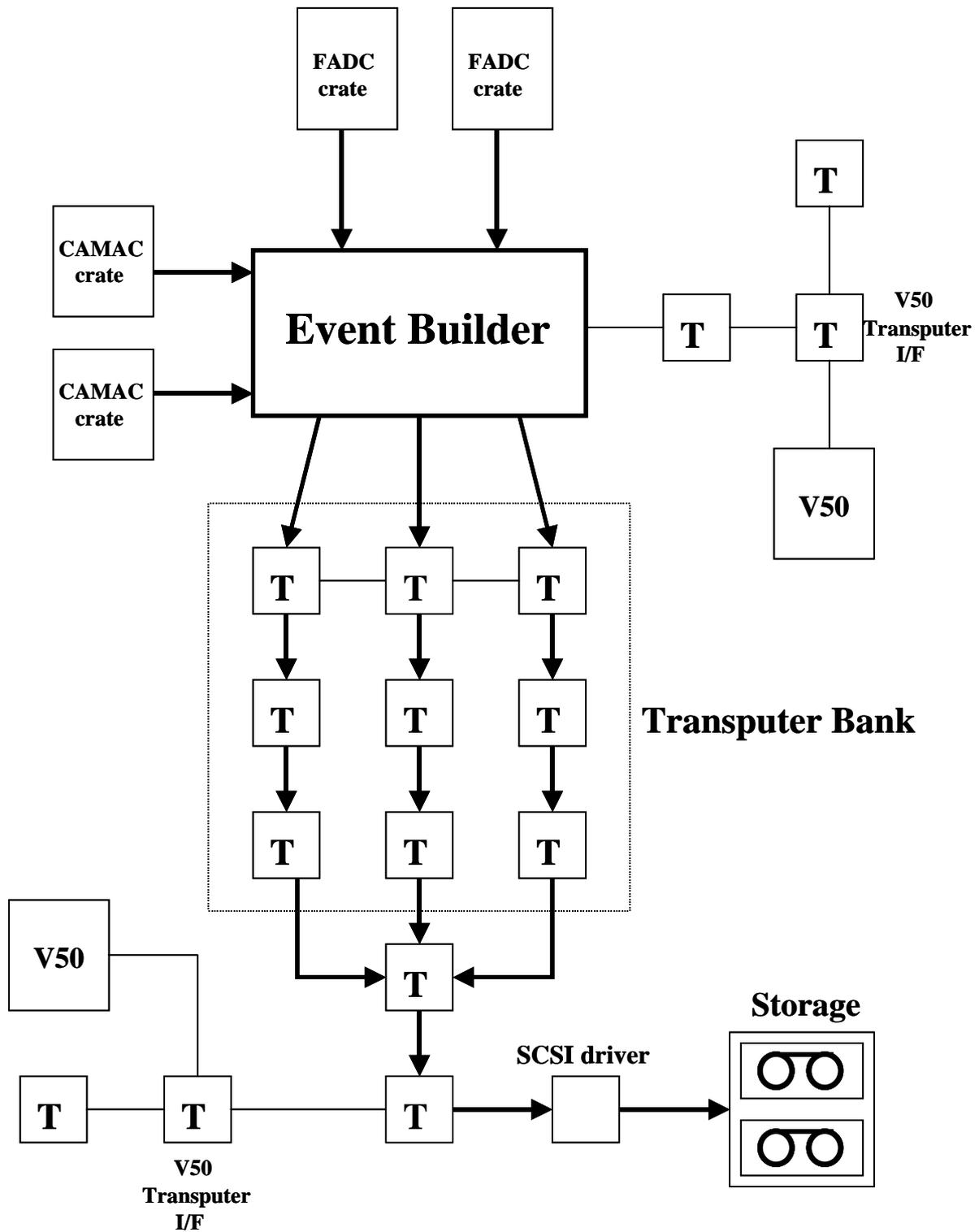


図 3.3 イベント・サブシステムとストレージ・サブシステムの概観

3.2 問題点

BESS のデータ収集系は今まで幾度かの改良を加え、約 10 年間使用されてきた。当時としては高性能であったこれらシステムも老朽化が進み、メンテナンスを行うとしても肝心の IC の入手が非常に困難となってきた。このため、新機能を追加しようとしても現システムでは対応のとり難い点もある。実際、今後南極で予定されている約 20 日間もの長期フライトに向けて、大容量のストレージ・システムが開発されている ([27])。このような状況にいつでも対応がとれるよう、拡張性、汎用性に富んだシステムが必要とされる。

また、現システムのネットワーク構成はモニタ・サブシステムにみられるように Omninet - LON と 2 つの通信プロトコルをまたいでいる。このようなプロトコルの混在により、システム全体としてネットワークによるオーバーヘッドが大きくなるとともに、負担が増える。これを避けるために、ネットワークを再構築し、より簡素で柔軟性、信頼性を確保したシステムが要求される。

旧システムでは各機能を 4 つに分散化することによって、当時として性能、電力の最適な構成を築いているのだが、現在市場に出回っている高性能・低消費電力の IC を利用すれば、1 つの低消費電力型 CPU で十分な性能が期待できる。つまり、分散制御型から集中制御型への変更である。こうすることにより各サブシステム間のネットワークである Omninet を排除し、より簡素なネットワークを構成できる。また今後の改良、追加に対応を取れるように、汎用的ないくつかのポートを備えておけば、十分な拡張性を確保できる。さらに低消費電力 IC の採用により、大幅な低消費電力化が期待できる。

3.3 新しいデータ収集系

前述したような背景を基に、4つのCPUに取って代わる新しい集中型情報制御装置「C-Bridge」を開発した。フライト中に行うべき動作、備えるべき機能等のいくつかは従来のシステムのもをほとんどそのまま引き継ぐことで、地上側のシステムに手を加えずに処理を行えるようにした。また多くの汎用的なI/Oポートを備えているのが特徴であり、様々なプロトコルに対応できるようになっている。従来のシステムの動作からすれば、C-Bridgeは約2秒に1回送られてくる2kbyte前後のイベント・データ、約1秒に1回各モタモジュールからランダムに送られてくる80byte前後のモタ・データ、同じくランダムに発生するメッセージ、そして地上からのコマンド等に素早く対応できなければならない。また生じた事象の時間情報などの管理も要求される。そのためCPUにはかなりの性能や周辺機能が必要とされる。こういった求められる動作を確実にこなすための必要なスペックを十分に考慮した上で、CPUにはMitsubishiのM32Rシリーズを採用した。これは32bit RISC CPUコアを搭載しており、内部バスが128bit、内部処理速度が80MHzである。これは図3.4に示した従来のCPUの性能と比べるとかなり高性能である。さらにDRAMを2MBも内蔵していることから外付けのRAMは必要がなく受け取るパケットをこの中に蓄えることができるため、パケットを処理するためにいちいち外部バスにアクセスするといったロスが減る。また、このCPUには周辺LSIとして同じく三菱のM35311というI/Oチップが存在し、DMA機能や割り込み機能といったCPUの負荷を削減する上で非常に役に立つ機能が豊富に備わっている。図3.5には各機能の対応を示した。右端には従来のシステムに備わっていた機能として必要な項目を挙げ、その横にそれらに対してC-Bridgeがどう対応しているか、また対応がとれているか示した。さらに右側には従来のシステムの各サブシステムに組み込まれた全てのボードを左端の機能の参考として挙げた。メモリに対しては上述したようにCPU内蔵のもので十分な対応が取れるので、それ以外に外付けで載せる必要はない。時間管理に関してはバッテリーバックアップ可能なRTCを載せてある。CIPと電氣的に絶縁するためにサブボードを載せている。地上への送信に関しては従来のシステムの送信ボードに載せてあるものと同じマルチ・プロトコルのシリアル・コントローラを使うことで地上側の受信システムに変更を加える必要がなくなる。受信に関してはM35311内蔵の平行ポートを使用した。図3.6に示すようにC-Bridgeの導入によって各サブシステムとの通信プロトコルは統一され、従来のOmninetは排除された。モタ系との通信はLONを用いることで、低消費電力の現モタ・モジュールがそのまま使用できる。イベント系は主なデータ処理をトランスピュータが行っているため、C-Bridgeとの通信にはそれほど複雑な処理を必要としない。そのためニューロン・チップ1つで十分性能を発揮でき、LONとシリアル・リンクのインターフェイスを製作することでLon Talkプロトコルによる通信を行っている。このインターフェイスについては第5章で述べる。ストレージ系との通信は新しく開発された大容量ストレージ・システム、通称「T-Pot」に備えられているシリアル・ポートとM35311内蔵のシリアル・ポートとを接続することで通信を行えるようになっている。図3.7には旧システムと新システムのネットワーク概観の比較を示す。

	New System	Present System	
	M 32R	V 40	V 50
Internal Speed	80MHz	8MHz	8MHz
Internal Bus	128bit	8bit	16bit
Memory	2MByte	-----	-----
Power Supply	3.3V	5V	5V

図 3.4 旧システムの CPU と新システムの CPU の比較

	New System	Present System			
For	C-Bridge	Communication Subsystem	Monitor Subsystem	Event Subsystem	Storage Subsystem
Processor	M32R	V40	V40	V50	V50
Memory	----- (2MB)	Memory Board (max 256kB)			
Time	RTC	RTC Board	-----	-----	-----
Network	-----	Omninet Board	Omninet Board	Omninet Board	Omninet Board
Ground (Transmit)	AMPSC	Transmit Board	-----	-----	-----
Ground (Receive)	Parallel (M35311)	Receive Board	-----	-----	-----
Monitor	LON Module	-----	LON I/F Board	-----	-----
Event	Serial Link I/F Board	-----	-----	Serial Link I/F Board	-----
Storage	Serial (M35311)	-----	-----	-----	Serial Link I/F Board
Insulation	Sub Board	Insulation Board	-----	-----	-----

図 3.6 求められる機能の対応表

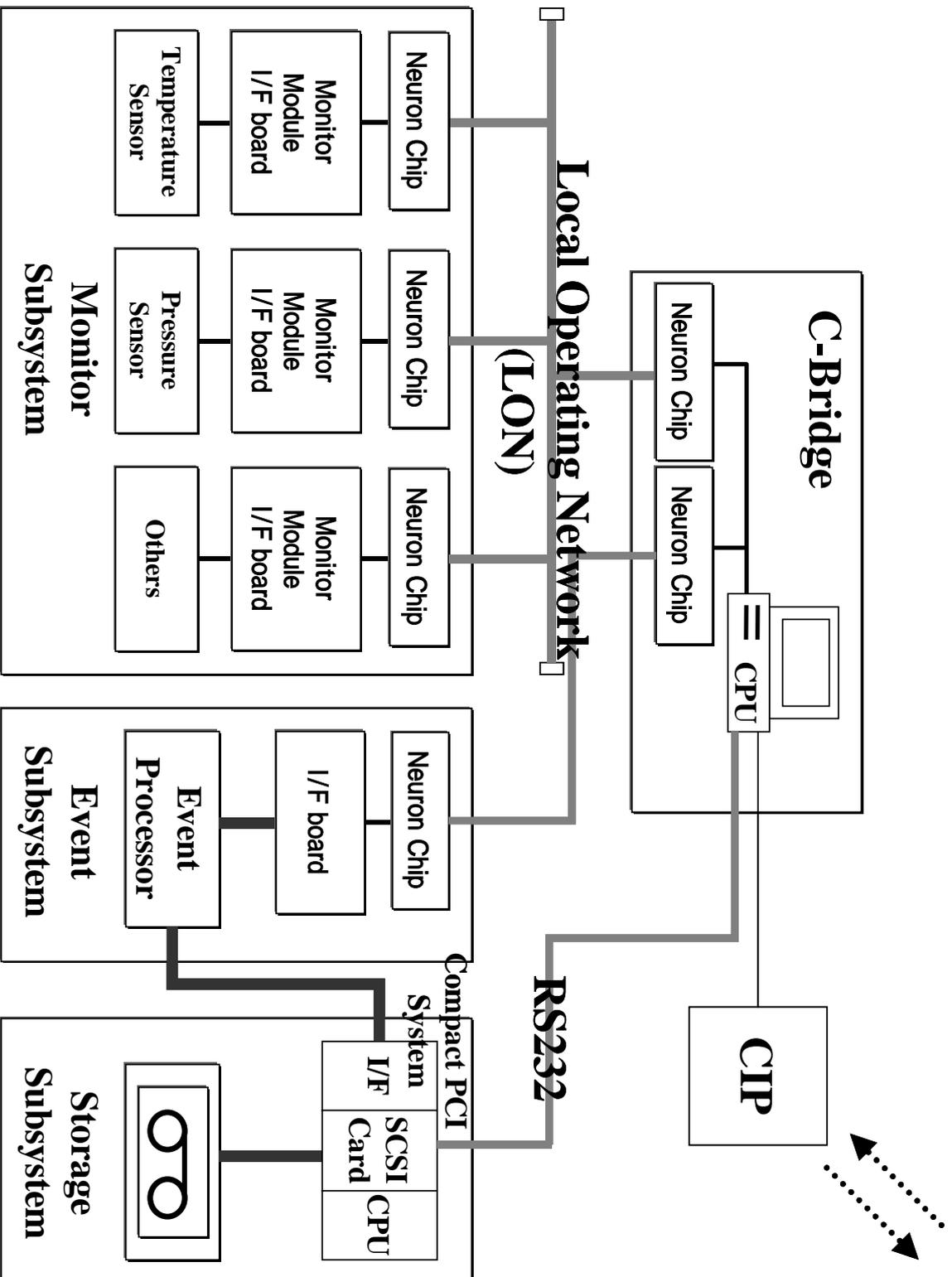


図 3.7 新システムの概観

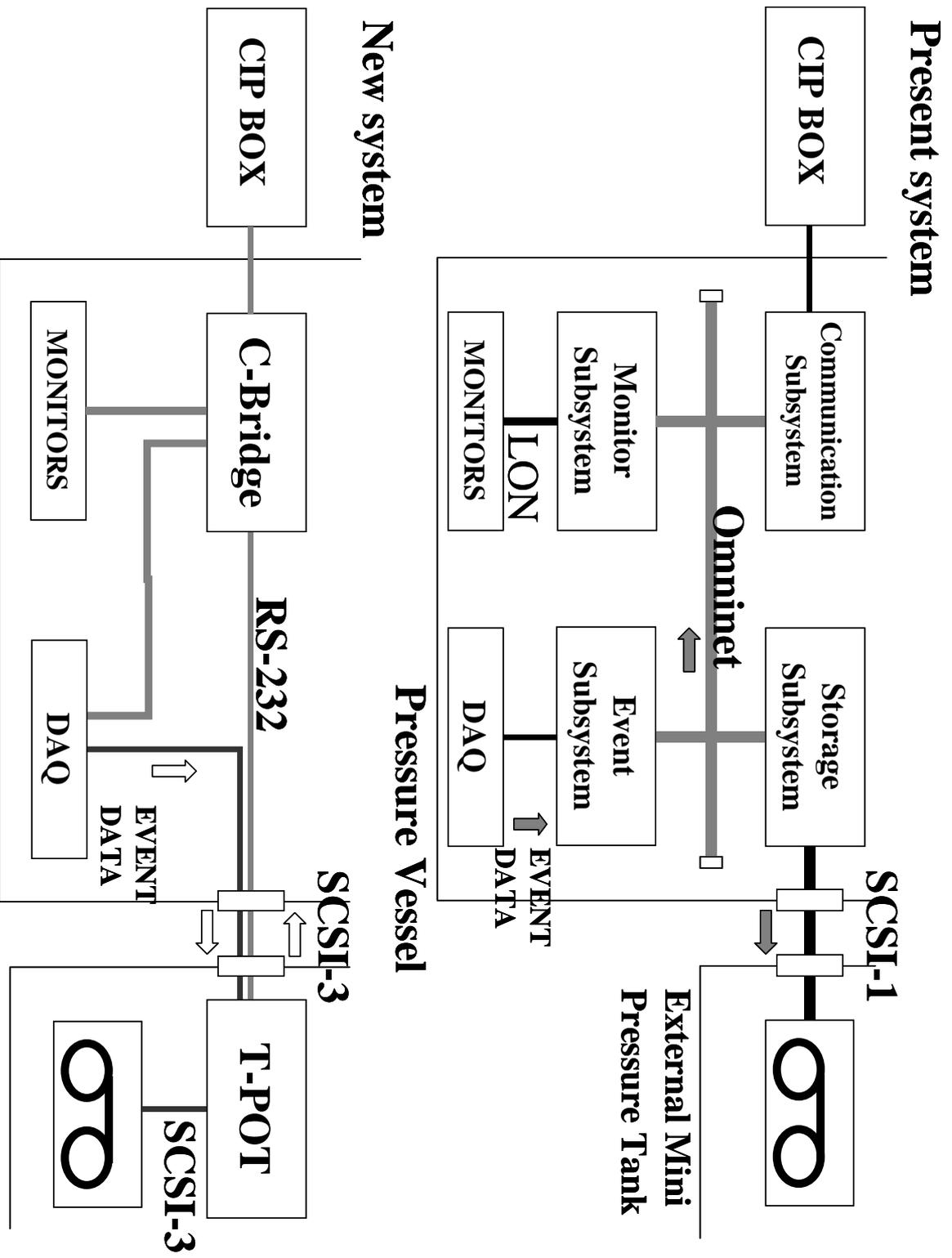


図 3.8 旧システムと新システムのネットワーク概観の比較

第 4 章 C-Bridge の開発

4.1 概要

C-Bridge は地上と各サブシステムとの情報の伝達を担う中央情報制御装置である。地上や各サブシステムから受け取るパケットの分析、処理、転送を 1 つの CPU で行い、また実際の時刻情報も管理している。CPU に 2MB という大容量な DRAM が内蔵されているためプログラムをこのなかに読み込めば、バス能力に関係のない CPU 内部の処理能力に依存した高速度、高性能で、より信頼性の高いプログラム実行能力を確保できる。さらに、CPU の負荷の減少に役立つ DMA や割り込みなど様々な機能をたくさん備えており、多少複雑な処理にも十分に対応がとれるようになっている。これだけの多様性に対して全体の消費電力が大きくなるように、電源電圧が 3V の IC を利用する事などで極力低消費電力化に努めている。

4.1.1 内部機能と動作

システム外部から不規則に情報を受け取る C-Bridge には CPU の動作をサポートするための I/O チップ (Mitsubishi M35311-1000FP) が搭載されている。これには様々なシステム・コントローラがあり CPU とその外部デバイスとのやり取りを容易にしている。また入出力端子のほとんどがダブル・ファンクション、もしくはトリプル・ファンクションになっていて、システム外部との通信に対して多くの機能が用意されている。以下これらの機能と動作について述べる。

システム・コントローラ

割り込みコントローラ

ある連続した処理の最中に、別の処理を行わせるために使われる。いつ起こるか分からない事象を CPU が待っているのでは効率が悪いので、CPU には他の処理をさせておき、その事象が起こった時点でこれに割り込みをかけ、それに応じた処理を行わせるようにする。具体的には、デバイスがこのコントローラに割り込み信号を送ることで、何らかの処理要求を伝える。この割り込み信号は最終的に CPU に送られ、CPU はそれまで行っていた処理を中断し、その要求に対する処理を優先して行う。

本コントローラは外部からの割り込み要因 10 個と I/O チップ内部からの割り込み要因 30 個の合計 40 個の割り込み要因に対して、7 レベルの優先順位をつけることにより状態を管理している。同一レベルの割り込み要因が複数同時に発生した場合は、あらかじめハードウェアで固定された優先順位が適用される。最終的な判定に残った

要因がステータス・レジスタへ記録され、CPU に対して割り込み要求を出力する。CPU はその時点で行っていた全ての処理を退避した後、このステータス・レジスタを読み、その要因に相当した割り込みハンドラと呼ばれるルーチンを読み出して実行する。図 4.1 に割り込み処理の流れを示す。

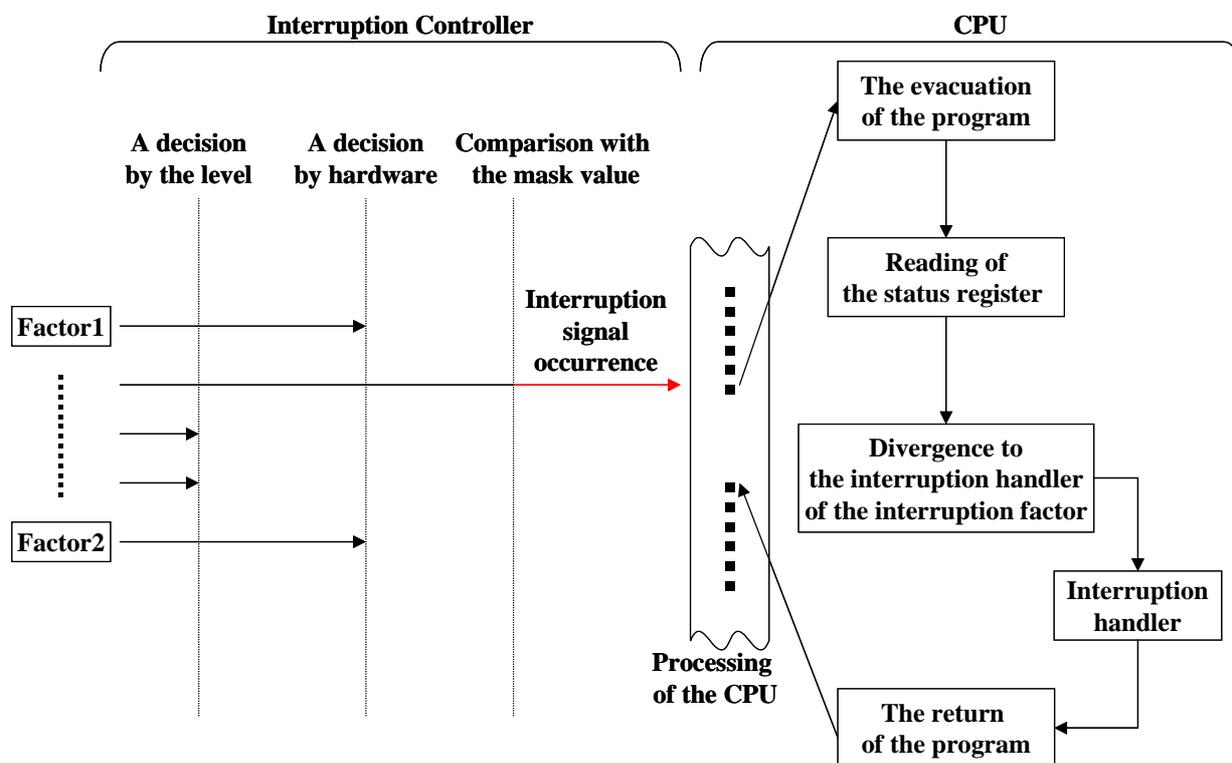


図 4.1 割り込み処理の流れ

DMA (Direct Memory Access) コントローラ

DMA とは CPU を介さずに直接メモリにアクセスしてデータのやり取りをすることで、高速なデータ転送が行えることと同時に、CPU の負荷を削減することができる。本コントローラでは、ソフトウェア、I/O チップ内蔵の I/O ポート、外部端子からの要求によって動作し、全部で 7ch 備えている。I/O チップからみた転送のパターンには以下のものが挙げられる。

- 外部デバイスと外部デバイス間のデータ転送
- I/O チップ内蔵の I/O ポート と外部デバイス間のデータ転送
- I/O チップ内蔵の I/O ポートと I/O チップ内蔵の I/O ポート間のデータ転送

今回主に使用しているのは と のパターンで、 では CPU 内蔵 DRAM と AMPSC 間、 では I/O チップ内蔵のシリアルポートと CPU 内蔵 DRAM 間において DMA 転送を行っている。

DMA 要求の優先度はハードウェアにより固定されており、チャンネル 0 が最も高くチャンネル 6 が最も低くなっている。

I/O コントローラ

外部デバイスアクセスのためのチップセレクト信号、リード/ライト信号のタイミング制御信号、ウェイト・サイクルの制御等をプログラマブルに行うことができる。また、計 3 本のバス・バッファ・コントロール信号により、外部にバッファを用いた場合の制御を行うことができる。全部で 8 チャンネル備わっており、チップセレクト信号は、チャンネルごとに 1 本ずつ用意され、リード/ライト信号は全チャンネル共通となっている。ソフトウェアで各チャンネルにメモリ領域を割り当てる事によって、そのアドレス空間のアクセス時に、各制御信号が設定されたタイミングで自動的に出力される。図 4.2 に I/O コントローラを用いた制御例を示す。

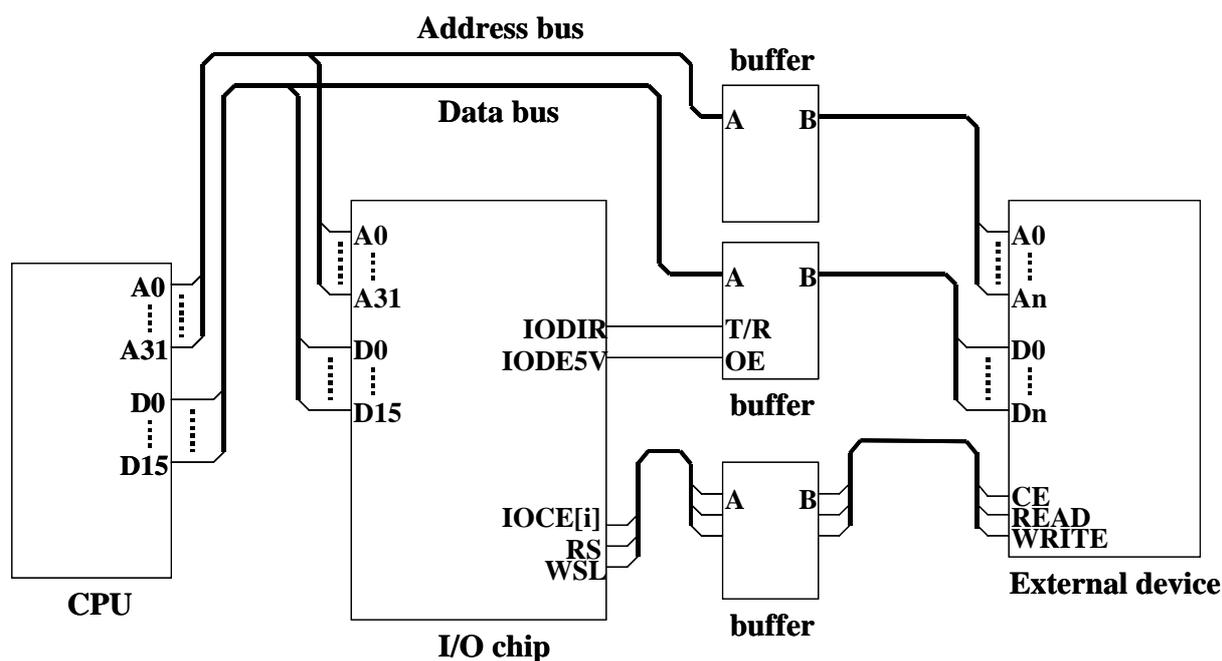


図 4.2 I/O コントローラを用いた制御例

I/O ポート

AMSPC (Advanced Multi-Protocol Serial Controller)

広範囲なシリアル・データ通信に使用できる多機能なコントローラで、定められたフォーマットに従って、パラレル・データをシリアル・データに、またはシリアル・データをパラレル・データに変換することができる。C-Bridge では地上へのデータの送信に使用し、転送速度は 15.6Kbps である。以下に示すシリアル通信プロトコルをサポートしており、地上側の仕様と合わせるためプロトコルは BOP を使っている。

同期同期 (Asynchronous)

COP (Character Oriented Protocol)

BOP (Bit Oriented Protocol)

また DMA 機能が備わっており、DMA 要求信号を出力できるほか、割り込み要求も出力できるようになっている。

LON

前述したように Lon Talk プロトコルを基に通信を行う。コントローラというよりは専用のマイコンであるニューロン・チップやトランシーバ等を組み込んでモジュール化してある。モニタ系、イベント系との通信に使われており、C-Bridge には全部で 4 つ備えてある。通信速度は 39.1Kbps である。このモジュールに関しては第 4 章で説明する。

UART

I/O チップは UART 対応のシリアル・ポートを持っており、C-Bridge ではこのポートの先に RS-232C のインターフェイス IC を取り付けている。RS-232C は OSI 階層モデルにおいて、物理的な媒体の電気的なインターフェイスや基本的なデータの変調方式について規定した物理層に相当するもので、広く普及したシリアル・インターフェイスである。このポートには DMA 機能、割り込み機能が備わっていて、対応するコントローラにそれぞれの要求を出力することができる。計 3 つのポートを備えていて、そのうちの 1 つがストレージ系との通信に使用されている。この間の通信速度は 19200bps である。また開発時コンピュータと接続し、コンソール上にメッセージ等を表示させることによってデバッグが容易に行える。

パラレル・ポート

地上からのコマンドは CIP によりパラレル信号に変えられる。これを受信するために I/O チップ内蔵の I/O ポートをパラレル・ポートとして使用し、全部で 16 ビット分用意されている。

PPP (Point to Point Protocol)

OSI のデータ・リンク層やネットワーク層を扱えるリモート・アクセス用のプロトコルであるため、UART より信頼性の高い通信が可能である。また、標準ハードウェア・プロトコルとして TCP/IP、UDP をサポートしている。ポートの先には UART と同じように RS-232C のインターフェイス IC を取り付けている。現段階では使用していないが、今後の拡張に対応できるよう 2 ポート備えている。

4.1.1 内部構成

C-Bridge は CPU、I/O チップ、ROM (Read Only Memory)、フラッシュ・メモリ、RTC (Real Time Clock)、各種プロトコル対応のコントローラ等からなるメイン・ボード、CIP と電氣的に絶縁するためのフォトカプラや RS-232C のインターフェイス IC 等からなるサブボード、ニューロン・チップやトランシーバ等からなる LON モジュール、そして電源制御用の基板から構成される。図 4.3 に C-Bridge の写真、図 4.4 にメインボードの構成図、図 4.5 にサブボードの構成図、図 4.6 に LON モジュールの構成図を示す。



図 4.3 C-Bridge
上：メインボード、サブボード、LON モジュール
下：メインボードと LON モジュール

メインボード

メインボードは 3V 系のバスと 5V 系のバスが混在している。それぞれの外部デバイスには信号のレベル変換やファンアウト数の増加を目的としたバッファを介して接続されているが、I/O チップのみ CPU と直結している。また各外部デバイスには前述した I/O コントローラの制御信号が接続されている。グラウンドは 3V と 5V 共通である。ほとんどの IC が表面実装タイプになっていて、基板自体が大きくならないようにしている。基板の寸法は横 34cm×縦 16cm であり、全部で 4 層から成っている。1 層目と 4 層目が配線、2 層目がグラウンド、3 層目が 3V と 5V の電源である。電源は電源基板よりケーブルを通じて供給される。

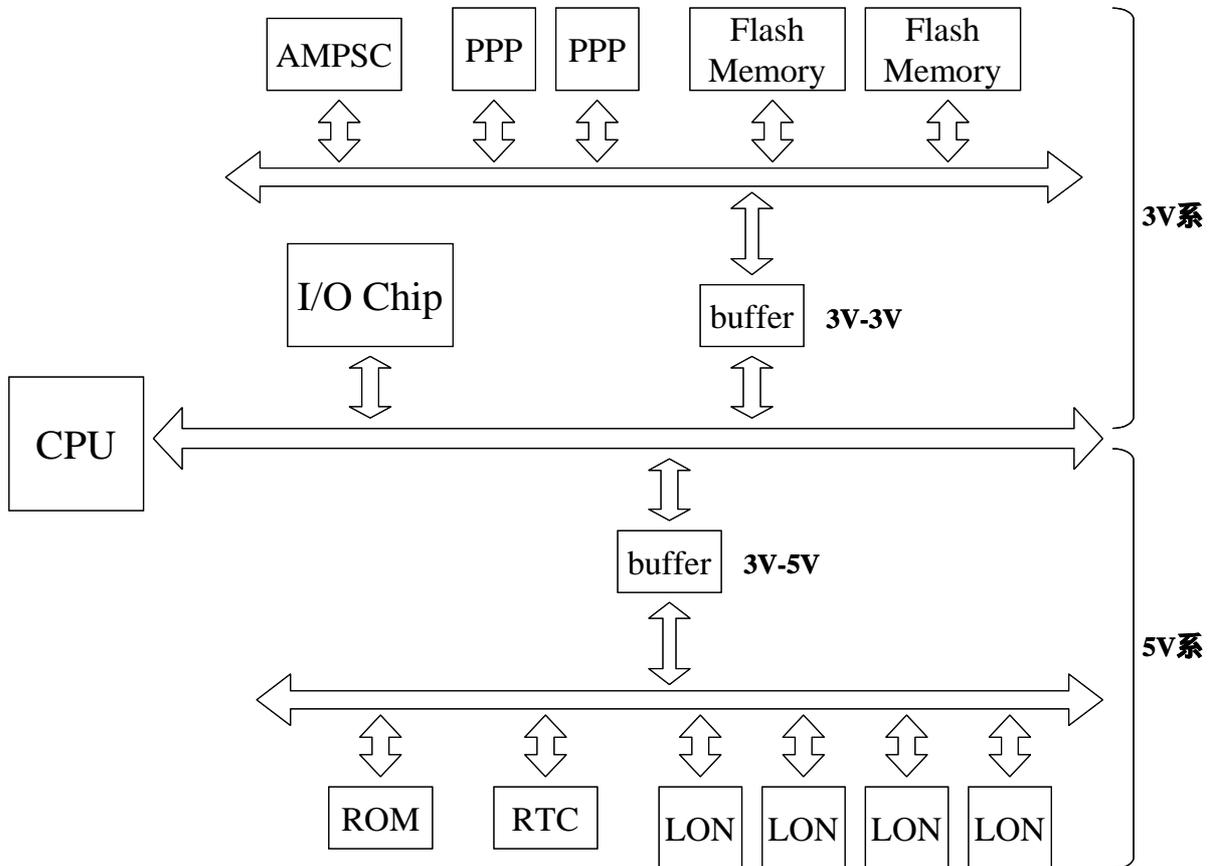


図 4.4 メインボードの構成図

サブボード

サブボードはフォトカプラを介して COM_TEL と呼ばれる CIP 側の電源とメインボード側の 3V-5V 電源を区切っている。そのためグラウンドは COM_TEL 用と 3V-5V 用の 2 つある。コマンドに使用される平行信号とストロブ信号、パケット送信用のシリアル信号、またリセット信号といった CIP に対する接続は D-Sub25 ピンのコネクタを用いている。その他、シリアル通信用に D-Sub9 ピンのコネクタが 3 つ付いている。これら 3 つのコネクタは全て UART 用であり、PPP に対しては、C-Bridge 基板を収納する 1U のボックスのフロント・パネルに備え付けられた 2 つの D-Sub9 ピンコネクタに基板から電線を繋げて用いる。同様に、他のサブシステムへ送られる 2 つのリセット信号もフロント・パネルに付けられたコネクタへと配線される。基板は 40 ピンのコネクタ 4 つを用いて、メインボードの上に取り付けられるようになっている。各信号や 3V-5V 電源等にはこのコネクタを介してメインボードと接続される。また OCM_TEL 電源に関しては外部から受け取り、基板に実装されたレギュレータで 5V に変換される。

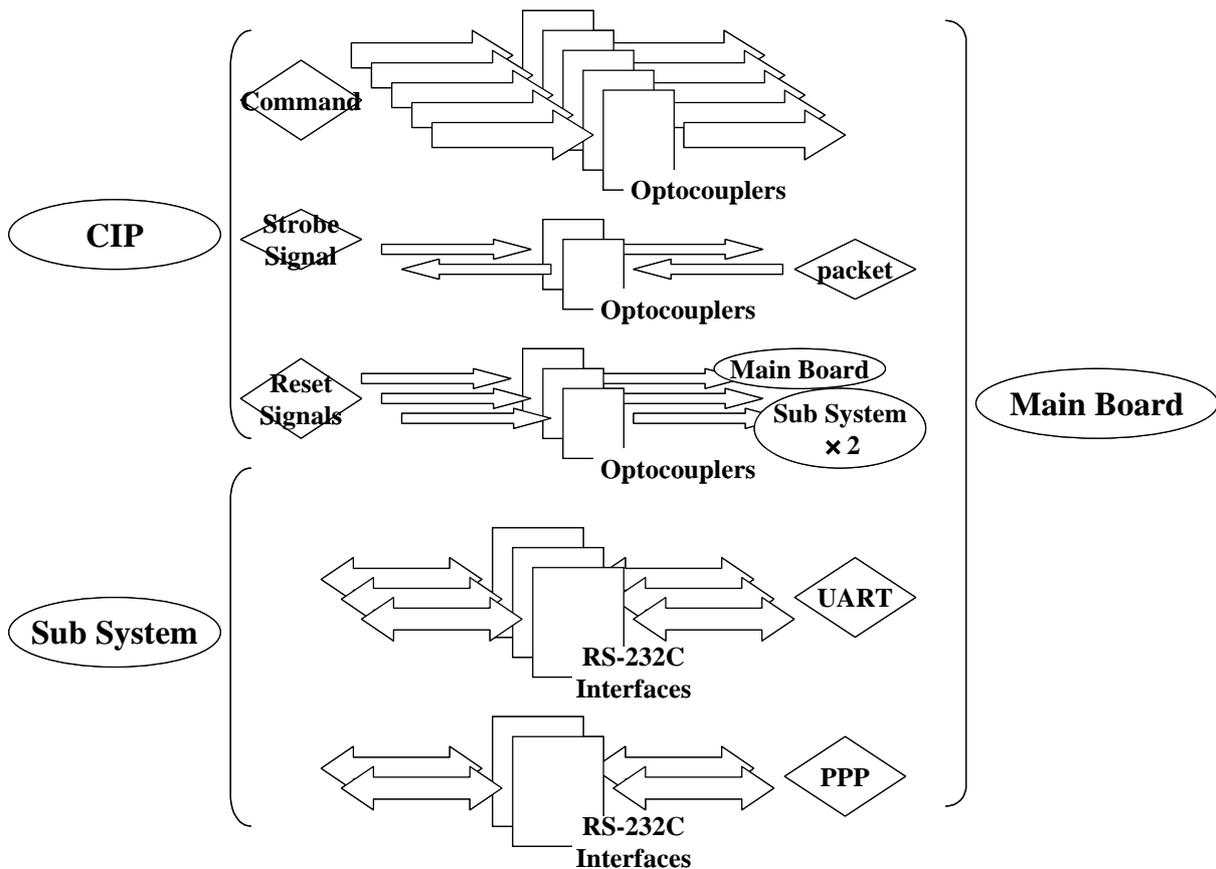


図 4.5 サブボードの構成図

LON モジュール

LON モジュールは簡単な構成になっていて上述したニューロン・チップとトランシーバのほかに電源周りの制御回路とクロック関係だけであるので、基板自体も 4cm×6cm と小さい。電源は 5V である。トランシーバには RS-485 仕様の IC を用いている。この通信ポートから先の配線は、メインボード上のコネクタからケーブルによって Box のフロント・パネルへと繋がられる。また、メインボードへの取り付けはサブボードと同じようにコネクタでの取り付けとなっている。各信号や電源はこのコネクタを通じてそれぞれの IC に接続される。以降この LON モジュールをノードと呼ぶことにする。

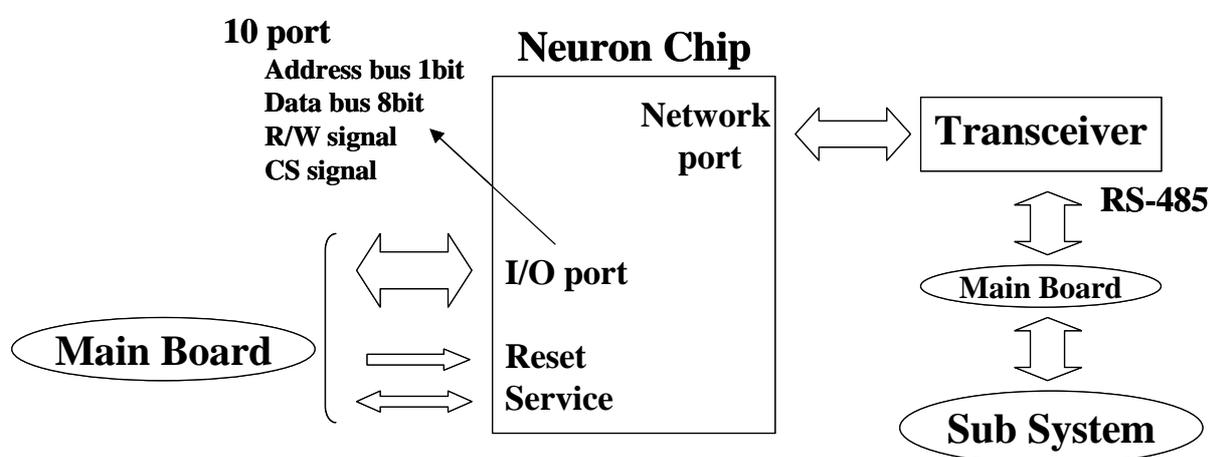


図 4.6 LON モジュールの内部構成

電源基板

電源基板は 3.3V 出力のレギュレータと 5V 出力レギュレータ、およびそれらを正常に動かすためのコンデンサーなどから成っている。出力された電圧レベルとグラウンド・レベルはケーブルを用いてメインボードへ配線される。

4.1.2 開発環境

開発は全て WINDOWS 環境で可能である。必要となるツールは CPU の開発ツールと LON に関するツールである。以下それぞれにおける開発手順を述べる。

CPU

今回使用した三菱 M32R シリーズには開発のためのツール統合開発環境 TM がサポートされている。この TM にはエディタ、コンパイラ、リアルタイム OS、シミュレータ・デバッガ、エミュレータ・デバッガが含まれている。本開発ではこれらのうちのコンパイラのみを用いて行った。図 4.7 に開発手順を示す。

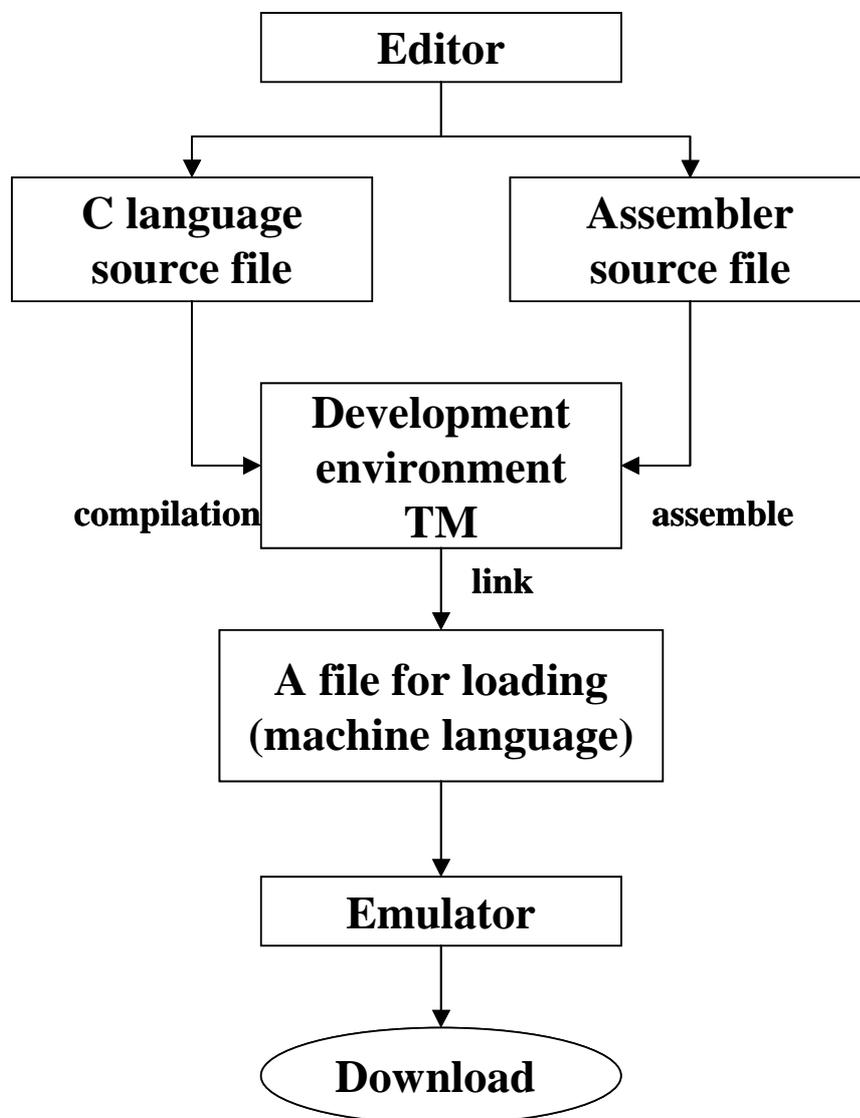


図 4.7 開発手順

プログラムの読み込みには R&D 社の ROM エミュレータ REM42 を用いた。これは PC のパラレル・ポートもしくは USB ポートを用いたプログラムの転送が可能である。これらツールのソフトウェアは、ほとんどアイコン操作のみであるので容易に扱える。基本的なデバッグは基板に取り付けた LED に各 IC のレジスタ設定値を表示させることで、動作させたい機能に設定されていることの確認を行い、オシロスコープを使って実際の波形をみることで、タイミング等の調整を行った。

LON

Lon Works には専用の開発環境である Lon Builder が用意されている。Lon Builder のハードウェアを使用することで作成したアプリケーション単体のエミュレート、ネットワーク上での動作確認、さらにネットワーク上を流れるパケットの監視等が行える。またソフトウェアではエディタ、アプリケーション開発用言語であるニューロン C のコンパイラ、リンカ、デバッガ等が揃っている。本開発では主にソフトウェアの方を使用した。ニューロン C は C 言語に似ており容易に記述できる。ただしニューロン C には main 関数はなく、プログラムの実行はスケジューラと when 節という独特な方式で管理される。図 4.8 にその概念を示す。この方式では必ずしもソース・プログラム上の順番通り実行されるとは限らず、またあるタスクを抜けるまで次のタスクには移れないので、一つのタスクに長時間かけることで他の優先したいタスクに影響が出てしまう。こういったことからプログラムを組む上で注意が必要となる。

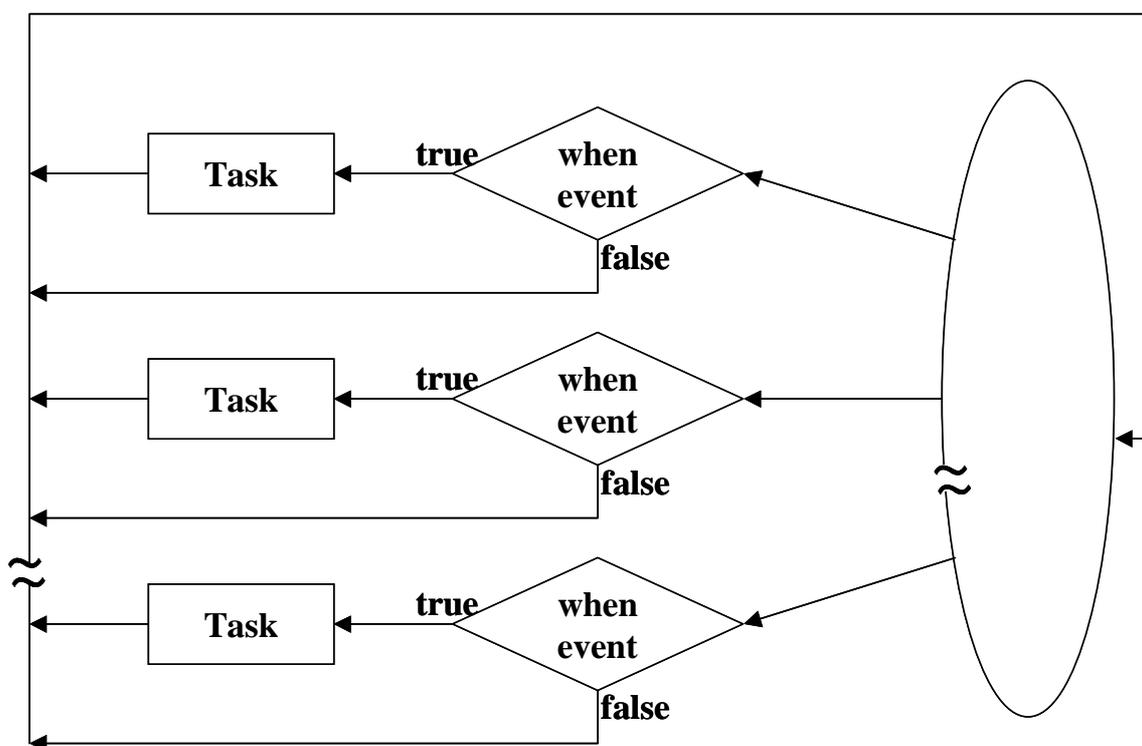


図 4.8 スケジューラ概念

アプリケーションの作成後はネットワークのインストレーションを行うのだが、これには専用の PC インターフェイス・カードと Lon Maker と呼ばれるソフトウェアを使用する。PC インターフェイス・カードはパソコンの PCI スロットに取り付け、アプリケーションをインストールしたいノードの通信ポートと物理的に接続させて使用する。Lon Maker は図 4.9 に示すように VISIO を使ってアプリケーションのダウンロード、ネットワークの構築を行う。デバイスのアイコンをドラッグ・アウトすることでノードが追加され、ダウンロードが可能となる。アプリケーション・ファイル等の各種設定を行った後、ダウンロードしたいノードのサービス・ピンを押すことによってそのニューロン・チップ固有のニューロン ID を PC インターフェイスを通じて受け取り、ダウンロードが開始される。また、いくつかのノードのバインディングも同じようにアイコンをドラッグ・アウトすることで行えるため開発が容易である。

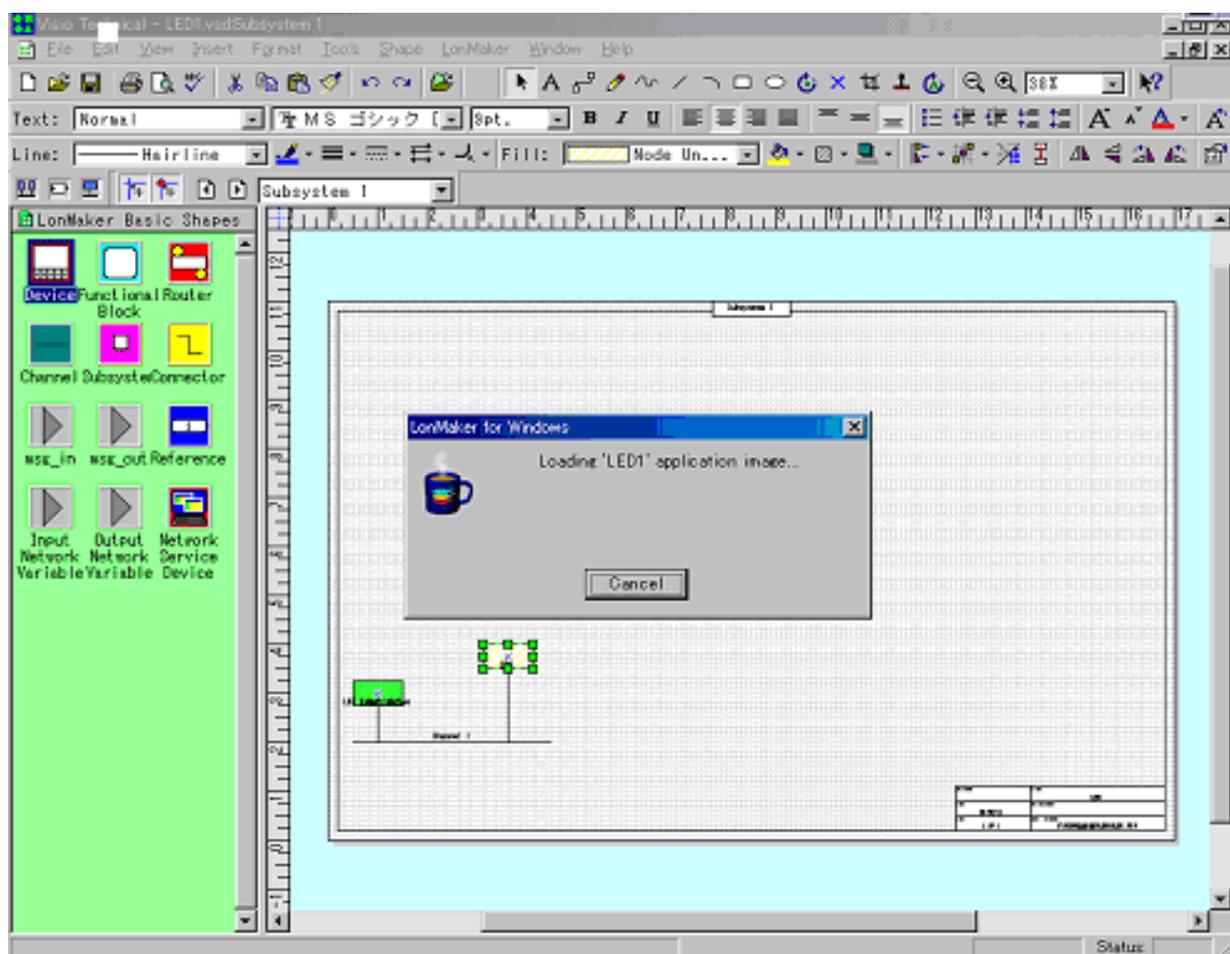


図 4.9 Lon Maker の画面

4.2 外部との通信

4.2.1 通信の概観

データ収集系には、大きく分けてコマンド、メッセージ、モニタ・データ、イベント・データ、サンプル・イベント・データ、ペDESTAL・データの6つのパッケージが流れている。サンプル・イベント・データはT-Potが出力するイベント・データの一部であるが、ここでは記述上分けて用いる。ペDESTAL・データは測定器立ち上げ時にチェンバーからくるキャリブレーション用データである。このうちのイベント・データを除いた5つのパッケージは、全てC-Bridgeに集められる。各サブシステムとの通信プロトコルは前述したとおりである。図4.10に各パッケージの流れを示す。

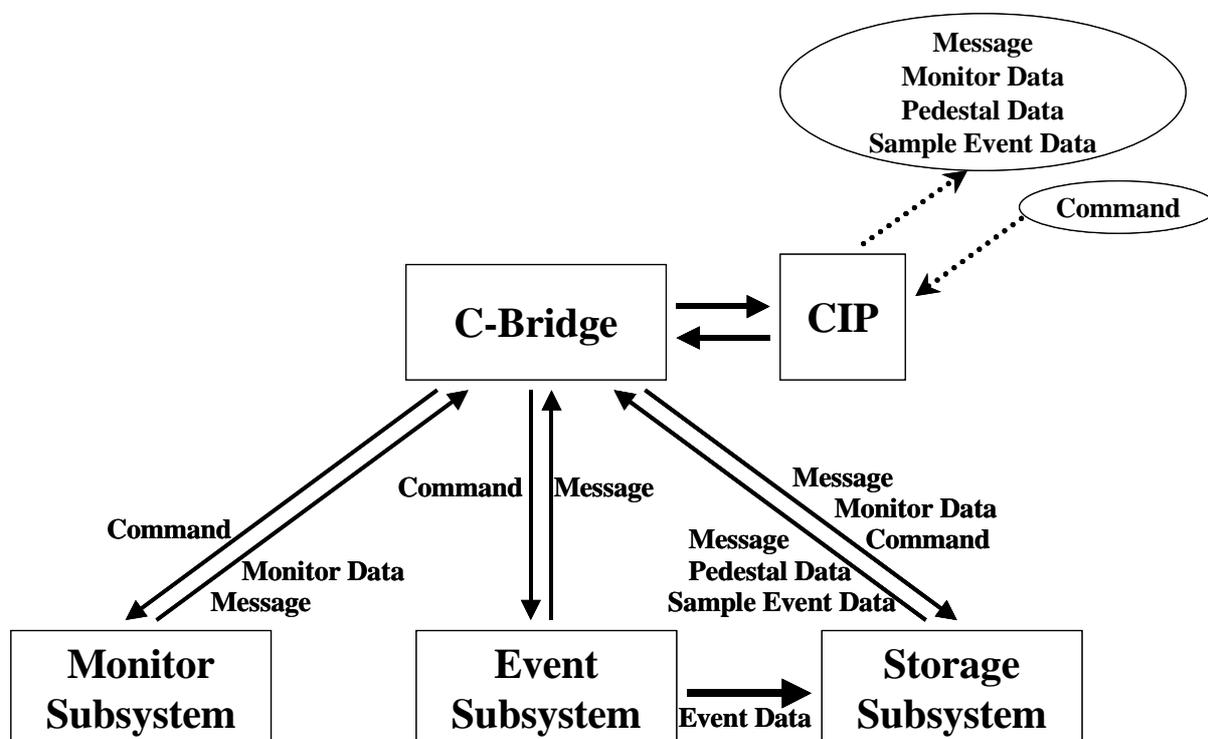


図 4.10 パケットの流れ

地上からのコマンドはパッケージのサイズは数バイトから30バイト以下で小さく、受信する頻度も少ないので、それほど高い処理能力は必要とされない。メッセージにはコマンドに対するレスポンス、T-Potから送られてくるサンプル・イベント・データの取得状況、そしてテープへの書き込み状況等が挙げられる。これらのサイズは大きいもので30バイトから40バイトと小さいが、後者2つのメッセージの頻度はそれなりに多い。またメッセージはテープにログとして記録される。モニタ・デ

ータは 80 バイト前後のサイズで各モニタ・モジュールから頻繁に受信する。このデータも地上へ送られオンラインでの監視を行うのと同時に、後のオフライン解析のためにストレージ・サブシステムへ送信され、テープへ記録される。ペDESTAL・データは測定器立ち上げのみに受信するデータで、500 バイト前後のデータが約 70 個送られてくる。サンプル・イベント・データは採取したイベントの情報をオンラインで確認するために、約 2 秒に 1 回 T-Pot から送られてくる。サイズはほぼ 2K バイト前後だが、大きいものではその 2 倍以上である。各通信をする上でこれらパケットの先頭には、コマンド、メッセージ、各データのどれであるか、サイズの大きさはどのくらいか、また送信先、送信元はどこかといったことを判別するための情報が詰まったヘッダが付けられる。各サブシステムはこのヘッダ情報をみて、その内容が確かであればそれぞれの処理を行う。

4.2.2 C-Bridge の常駐動作

C-Bridge の動作はメイン関数の無限ループ内に記述されている。その内容を挙げると以下の通りである。

- ・ 処理 1 地上への送信
- ・ 処理 2 T-Pot への送信
- ・ 処理 3 T-Pot からの受信パケットの処理
- ・ 処理 4 T-Pot 通信時の受信エラー・メッセージ処理
- ・ 処理 5 モニタ系ノードとのハンドシェイク（送受信処理）
- ・ 処理 6 イベント系ノードとのハンドシェイク（送受信処理）
- ・ 処理 7 受信コマンドの処理

起動と同時に各 IC のレジスタ設定を行い上記動作を繰り返す一方で、割り込みによって地上からのコマンド受信処理や T-Pot からのパケット受信処理、RTC からの時刻更新情報の処理等いくつかの処理が要求される。パケットは頻繁に送られてくるので、その都度地上、もしくは T-Pot に送っていたのでは間にあわない。そのためそれらパケットを一時保管しておくようなメモリ領域が必要であり、地上への送信パケット格納用に 128K バイトのリング・バッファ、T-Pot への送信パケット格納用に 30K バイトのリング・バッファ用意してある。処理 1、処理 2 の地上、T-Pot への送信処理はリング・バッファに送信パケットが存在し、かつその時点でパケット送信中でなければ実行される。送信完了後リング・バッファのステータスを更新する。

ほとんどの受信パケットや、C-Bridge 自身が出すメッセージ等は受信した時点、もしくは発生した時点で地上送信用と T-Pot 送信用にパッケージ化され、それぞれのリング・バッファに書き込まれる。しかし T-Pot からの受信時ような割り込み処理の中での受信パケット、エラー・メッセージは、そのままリング・バッファに書き込む事ができない。なぜならばリング・バッファに何らかの情報を書き込んでいる最中にこの割り込みがかかってリング・バッファにその内容を書き込んでしまうと、メモリが破壊されてしまうからである。それを避けるために T-Pot から受け取るメ

メッセージとデータの packets 格納用にそれぞれ 128×16 バイトと 8192×30 バイトの配列型バッファが用意し、この受信割り込みの処理中では一旦これらのバッファに受け取った packets を保管するようにして、割り込み処理終了後にリング・バッファにコピーするような形をとっている。この保管された packets をリング・バッファにコピーしているのが処理 3 である。

また、T-Pot 通信時の受信エラーに伴って発生する割り込み処理内でもそのエラー・メッセージをリング・バッファに書き込むことはせず、その時点ではフラグを立てるだけにして、割り込み終了後の処理 4 によりそのフラグに応じたメッセージをリング・バッファに書き込むようになっている。

処理 5、6 ではモニタ系、イベント系に対する packets の送信や受信、また受信 packets のリング・バッファへの書き込みを行う。

処理 7 ではコマンドが存在することを表すフラグが立っていれば、受信したコマンドを読み込み、分析を行う。受け取ったコマンドの先頭に付けられたヘッダには“どこ宛か”という情報が示されており、自分宛であればそれに応じた処理を行い、そうでなければヘッダ情報等を再構築しそのコマンドを対応するポートの通信形式に合うようパッケージ化する。そしてモニタ系、イベント系であればそれぞれのノードに対してコマンドの存在を表す別のフラグを立て、処理 5、6 で送信される。ストレージ系であれば送信用バッファに書き込み、処理 2 で送信される。

次に各部における packets 送受信動作について述べていく。

4.2.3 地上との通信動作

地上から受け取るコマンドはパラレル信号、地上へ送る各 packets はシリアル信号である。受信には I/O チップ内蔵のパラレル・ポート、送信には AMPSC (NEC uPD72001) を用いる。

受信部：

受信時にはコマンドのパラレル信号と同時にストローク信号が受信され、C-Bridge はこのストローク信号で割り込みをかけることにより、コマンドが送られてきたことを知る。各信号はストローク信号が 1ms 幅のロー・レベルの信号に対してパラレル信号は約 150ms 幅であり十分余裕のあるタイミングで送られてくる。コマンドは 1 文字ごとに送られ、サブボード上のフォトカプラで絶縁された後、I/O チップによって受信される。割り込みはストローク信号の立下りでかかり、C-Bridge は割り込みルーチンの中で受け取った文字を読み込む。

無線通信では地上から送った文字列が途中で欠けてしまうことがあるため、地上側では文字列の確認に対して簡単な演算を行い、その値を文字列に加える。また、文字列の最後には NULL 文字が付けられる。図 4.11 にコマンドの packets 構造を示す。ヘッダの構成は行き先によって異なる。初めの 1 バイトはどのサブシステム宛かを判断するための情報がある。C-Bridge、T-Pot 宛であれば、ヘッダはこの 1 バイ

トのみであるが、モニタ系宛ならさらにどのノード宛かといった情報、イベント系宛ならノードの情報に加えてどのモジュール宛かという情報などが加わってくる。

C-Bridge は 1 文字受け取るごとに地上側と似たような演算を実行する。NULL 文字を受け取った時点で文字列の最後とみなし、地上側が送信した値と自らが計算した値が一致していれば、コマンドの存在を表すフラグを立てる。このフラグは上述した処理 7 によって参照され各処理がなされる。逆に一致していなければ、エラー・メッセージを返す。図 4.12 にこれら一連の動作を示す。

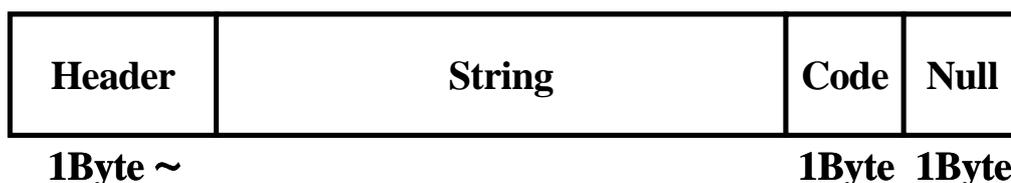


図 4.11 コマンドのパケット構造

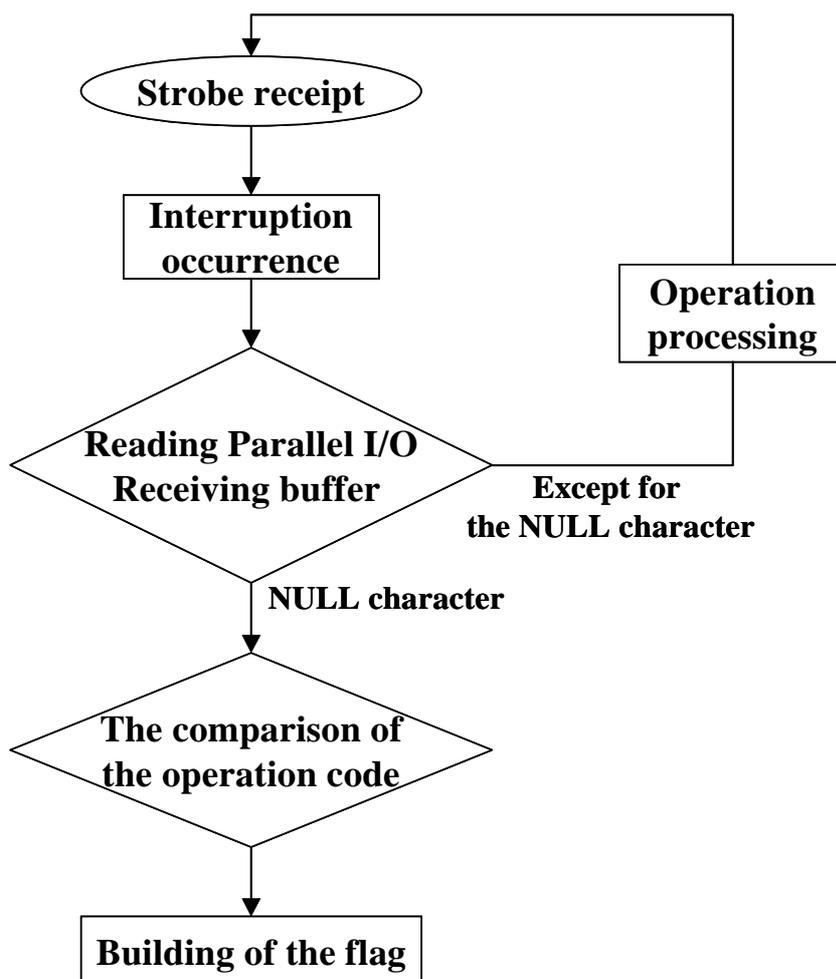


図 4.12 コマンド受信時の動作

送信部：

地上へ送るべきパケットには地上側でパケットの種類やサイズ、そして時刻情報等を確認できるようにヘッダを付ける必要がある。これは C-Bridge が各サブシステムからパケットを受け取った時点で加えられ、送信用バッファへと格納される。ヘッダのサイズは 24 バイトあり、この構造を図 4.13 に示す。

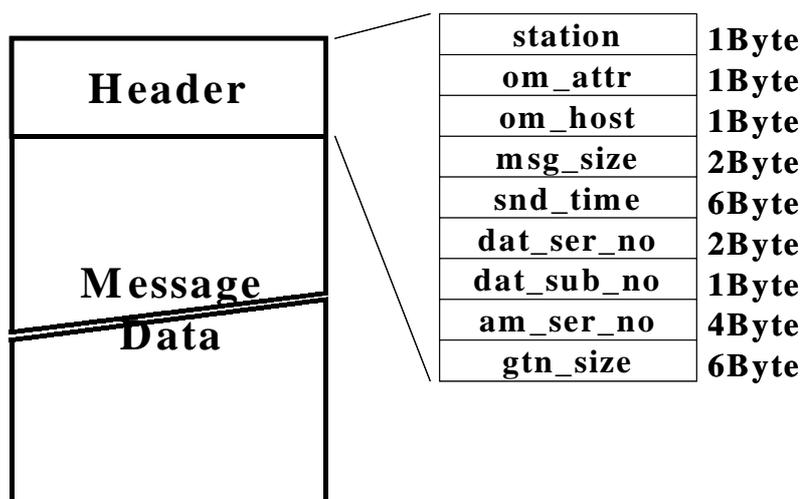


図 4.13 メッセージ、各データの packets 構造

このヘッダは地上側のソフトウェアに対応させるため、Omninet 存在時のヘッダ内容をそのまま用いている。したがっていくつかの情報は扱っておらず、現段階で使用しているのは以下の情報である。

- station パケットの種類を表す
 - メッセージ 0x90
 - モニタ・データ 0x87
 - イベント・データ 0x30
- msg_size パケットのサイズを表す
- snd_time パケット送信の時間を表す
- data_sub_no
- am_ser_no パケット番号を表す

送信時の処理としては DMA を使用する。地上への送信パケットは全てのサブシステムから頻りに集められてくるので、これを CPU が毎回転送処理しては負荷が大きくなって効率的ではない。これを避けるために、送信時に AMPSC へと転送バイト数の設定を行い、DMA コントローラへと転送元アドレス、転送先アドレス、

転送バイト数といった情報を設定する。その後 DMA を起動することによって、AMPSC は 1 バイト送る毎に DMA 要求を出し、DMA コントローラはその要求を受け取る度に CPU 内蔵 DRAM に直接アクセスしてデータの読み込み、AMPSC へと転送する。これにより CPU 内蔵 DRAM と AMPSC の間でのデータ転送を容易に行っている。AMPSC の DMA 要求回数は自分自身によって自動的にカウントされ、DMA 起動時の設定回数と一致したら割り込み要求信号を出力し、全てのデータ送信を終了したことを知らせる。CPU は割り込みルーチンの中で DMA 終了の処理を行い、リング・バッファに使用されている各パラメータを更新する。これが処理 1 関係の動作である。図 4.14 にこれらの流れを示す。

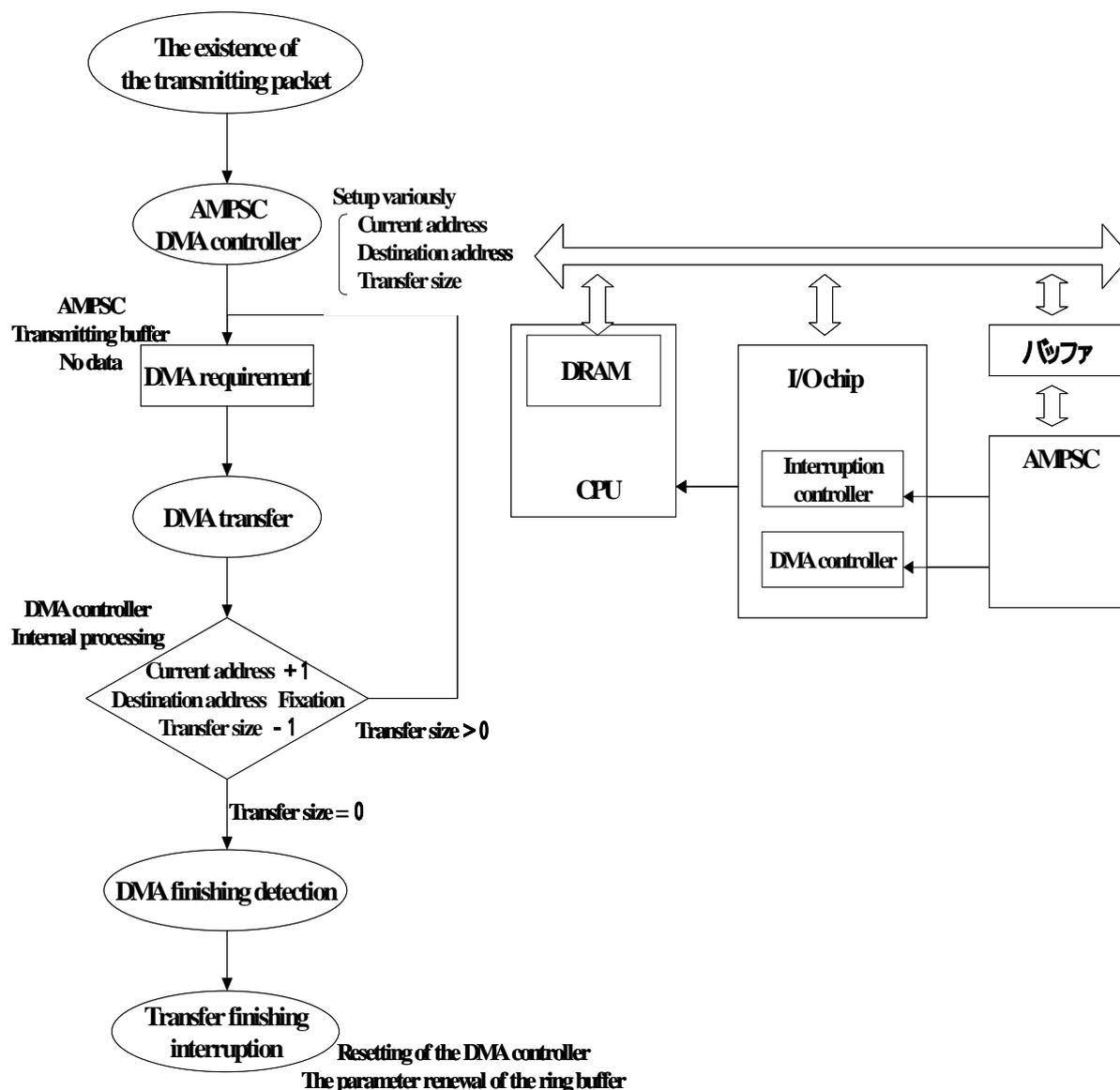


図 4.14 地上送信時の動作の流れ

4.2.4 モニタ系との通信動作

C-Bridge に搭載されたノードが各モニタ・モジュールとの通信を担当している。LON は非常に優れた通信手段であり、ネットワーク上にぶら下がったノードによって制御される。ネットワークの分散化が特徴の一つであり、メンテナンス、拡張等が容易である事から、小規模なモジュール群で構築されているモニタ系には適している。ノードの機能として以下の事が挙げられる。

ネットワークの監視
情報の管理
デバイスの制御

これらは内部に組み込まれているニューロン・チップによって行われる。ニューロン・チップには EEPROM、RAM、ROM といったメモリが備わっており、Lon Talk プロトコルやアプリケーションのライブラリ等がファームウェア化されて ROM に入っている。そのためユーザは EEPROM 内にアプリケーションをつくり実行させることでデバイスの制御等が可能である。また、各モニタ・モジュールのようにマスタとして働いて制御対象を管理することがほとんどだが、C-Bridge 内部のノードのようにスレーブとして働きマスタに受け取った情報を提供する事も可能である。この場合マスタとなる CPU はノードの I/O ポートの状態をみてハンドシェイクを開始する。この時ポート[0]が L レベルであればノードはハンドシェイク可能とみなされ、その一連の処理、ハンドシェイクの確立からデータの受け渡しまでを行う。H レベルであればビジー状態であり、ハンドシェイクは開始できない。この様子を図 4.15 に示す。

ノードが CPU から受け取るのはコマンドのみである。ノードはパッケージ化されたコマンドのヘッダ情報を分析し、ネットワーク上のどのノードに送るのか、サイズはいくらかといった情報を Lon Talk プロトコルに当てはめる。その後あらかじめハードウェアでサポートされた通信動作を他のノードと行う。また、各ノードから受け取ったモニタ・データやメッセージ、そして自らが出すメッセージのサイズや送信元等の情報をデータまたはメッセージと共にパッケージ化し、ハンドシェイク確立時に CPU へと渡す。図 4.16 に CPU とノードの間で扱われるパッケージの構造を示す。1 バイト目にサイズ、2 バイト目にネットワーク上の各ノードに割り当てられた番号、3 バイト目にはパケットの種類が入っている。これらパケットのヘッダ部分は受信時に地上送信用に再構築されリング・バッファに書き込まれる。

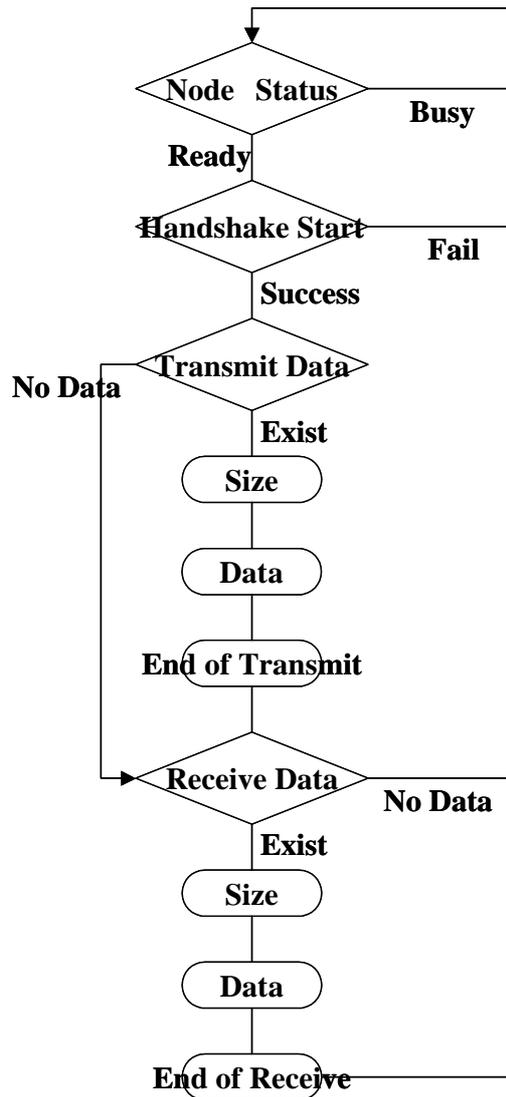


図 4.15 CPU - NODE 間のハンドシェイクの流れ

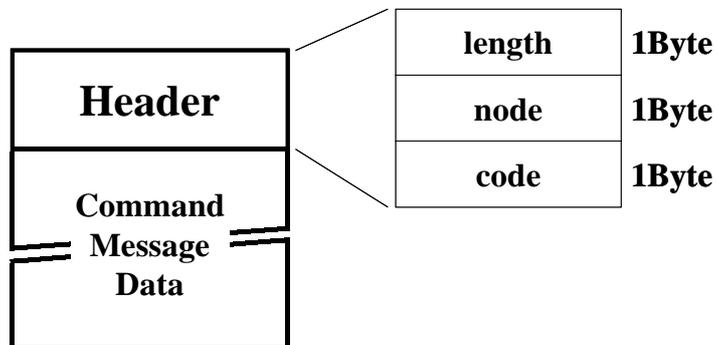


図 4.16 CPU - NODE 間で扱われるパッケージ構造

4.2.5 イベント系との通信動作

イベント系の LON はモニタ系とは独立に組まれている。そのため C-Bridge 内部にはモニタ系に対するノードとは別にイベント系に対するノードが置かれている。その動作内容はモニタ系とほぼ同じであるが、コマンド、メッセージのみの処理であることと通信相手が DAQ I/F 内のノードだけであることから全体として簡素な通信ラインである。DAQ I/F に関しては第 5 章で述べる。

4.2.6 ストレージ系との通信動作

送信：

T-Pot への送信は地上への送信とほぼ同じ頻度で行われる。よってここでも CPU の負担を減らすために DMA を用いて、転送を容易に行っている。I/O チップの SIO コントローラは送信バッファが空になるときに DMA 要求を DMA コントローラに出す。DMA の終了は起動時に DMA コントローラに設定した転送サイズから認識され、終了確認後割り込み要求を出す。割り込みが受け付けられれば、それに応じた処理をおこなう。

パケットの構造は図 4.17 に示すように、最初に 4 バイトの特定な文字列を付け、その後パケットの種類を分別するためのコードを 1 バイト、パケットサイズを 1 バイト加えている。UART のみでは通信における信頼性がないため、こうする事によって何らかの原因で化けてしまったパケットを誤って記録してしまうといったことを避けることができる。T-Pot 側では先頭の 4 文字、コードが規定されたものと一致していれば正規のパケットとみなしテープに記録する。図 4.18 に送信時の動作の流れを示す。

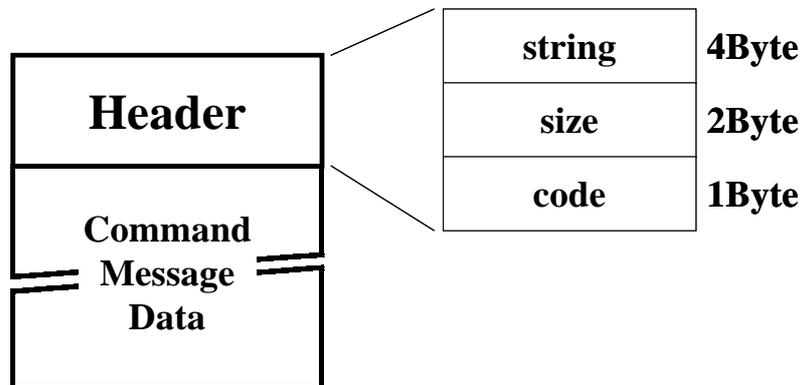


図 4.17 C-Bridge - T-Pot 間のパケット構造

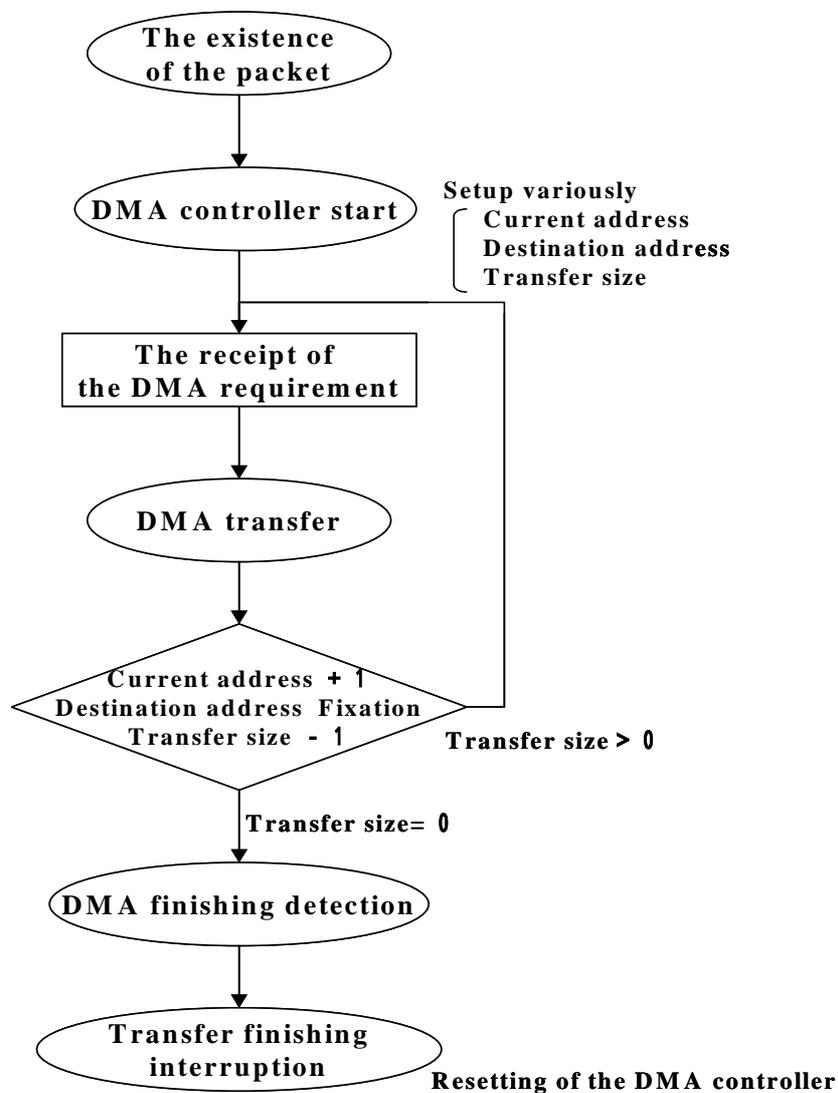


図 4.18 SIO 送信時の動作

受信：

パケットの受信には割り込みを用いている。1 バイト受け取るたびに SIO コントローラは割り込み要求を出し、受け入れられれば CPU は受信バッファを読みに行く。SIO 受信部からの割り込み要求が一番頻度が多いので待ち時間を減らす必要がある。そのため他の割り込み要求に比べて、その優先度を最も高いものにしている。CPU は始めにヘッダ情報を読み先頭の特定文字列、コード等の確認後、正規のものであればヘッダ内に書かれたサイズ分だけ内容を取り込み、そうでなければそのパケットを無視し次のパケットの先頭文字列を探す。また受信時にエラーが生じれば同じように割り込み要求を出し、割り込みハンドラ内で受信関連のレジスタをリセットすると同時にエラーに応じたフラグを立てている。図 4.19 にこれらの動作の流れを示す。

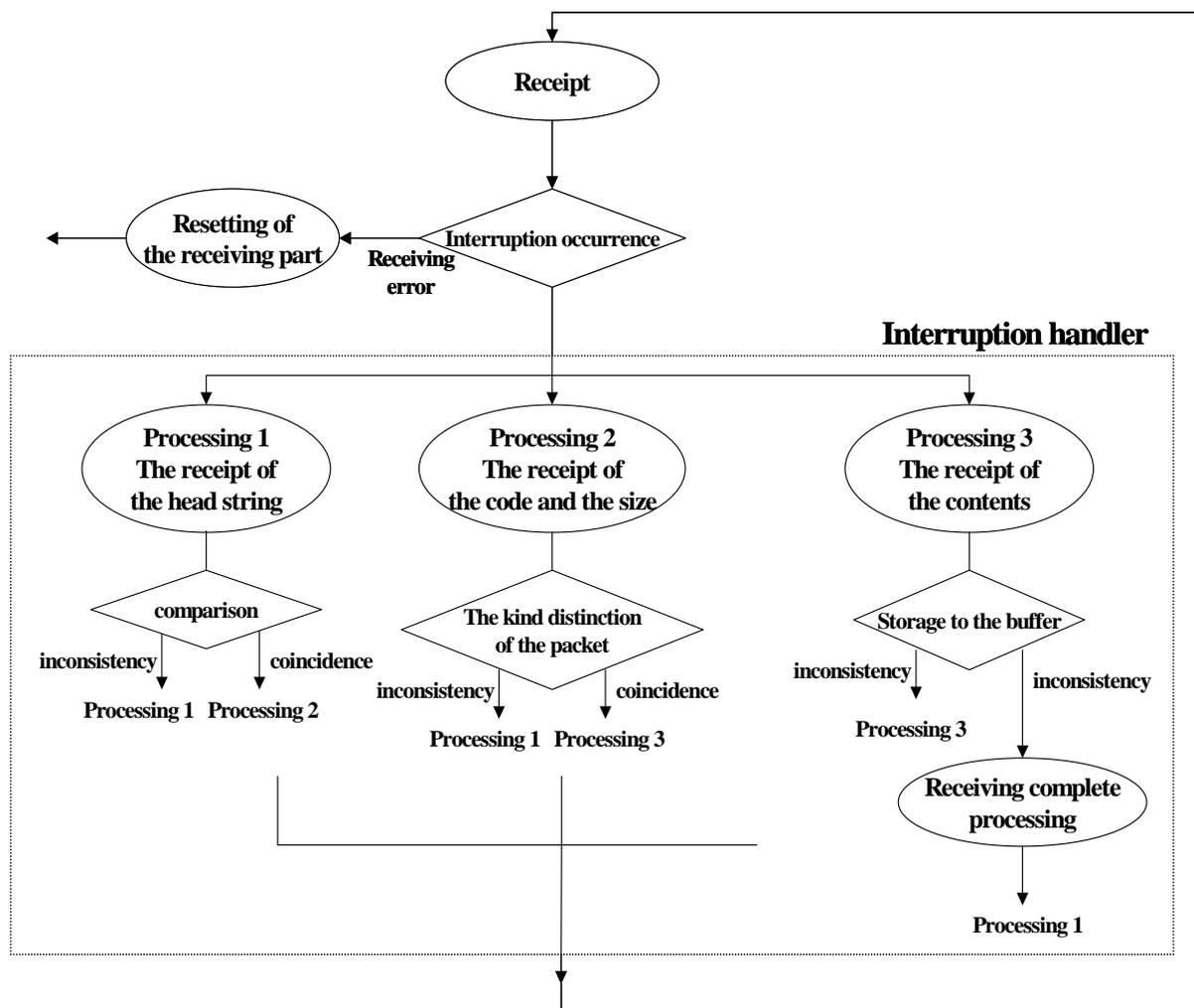


図 4.19 SIO 受信時の動作

4.2.7 その他の動作

これまでに述べた動作の他に RTC による計時がある。これは主に地上送信用パケットのヘッダを構築する際にアクセスされ、その時点での時間情報が読み出される。また、最後にコマンドを処理してからどのくらい時間が経っているかを示すために、RTC は 1 分毎に割り込み信号を出している。CPU はこの割り込みを基に、コマンドに対するアイドル時間をメッセージとして地上に送っている。

第5章 DAQ I/Fの開発

新しいデータ収集系ではイベント系との通信に LON を使用する。イベント系ではトランスピュータによる制御がされており、その間のパケットのやり取りにはシリアル・リンクが利用されている。したがってこれと通信するためには、一度 LON で受け取ったものをシリアル・リンクへ変換、もしくはシリアル・リンクで受け取ったものを LON に変換するようなインターフェイスが必要となる。本章ではこのインターフェイスの開発について述べる。

5.1 構成

内部構成は図 5.1 に示すように簡単であり、主に NODE、PLD、シリアル・リンク・インターフェイス IC から成っている。PLD は programmable Logic Device の略で簡単な論理回路を内部に構築することができ、NODE とシリアル・リンク・インターフェイス IC 間の制御回路として働いている。実際 74 シリーズ等の IC を組み合わせで設計もできるのだが、PLD の長所は論理の正誤を判断できること、シミュレーションによるタイミング調整が可能なこと、基板への実装面積を減らせること、さらに何度でも修正が利くこと等が挙げられるため、PLD を使った回路設計を行った。

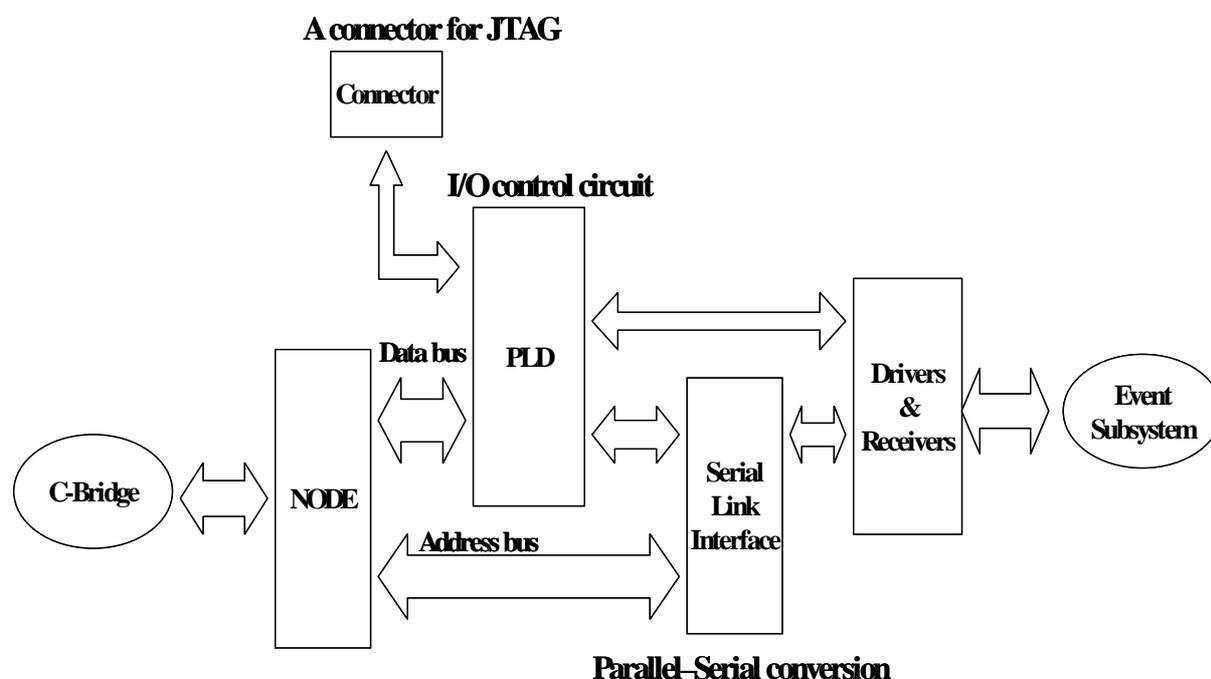


図 5.1 DAQ I/F の内部構成

5.2 開発環境

主に必要となるのは LON の開発ツールと PLD の開発ツールである。LON については前述した通りであり、PLD についても WINDOWS 環境での開発が可能である。ロジックの記述は今回使用した PLD メーカー Altera によりサポートされたソフトウェアを用いて行える。これは一般的な CAD のように画面上で回路図を構成していくもので、無償でダウンロードができる。図 5.2 にこの PLD 回路設計における作業の流れを示す。

設計完了後は実際に PLD へと書き込みを行う。これには JTAG ピン 4 本による ISP (In System Programming) がサポートされており、PC のパラレルポートとこれらのピンを専用のケーブルで繋げることにより書き込みが行える。ROMライター等を必要とせず、基板に実装した形で書き込みが行える点が便利である。

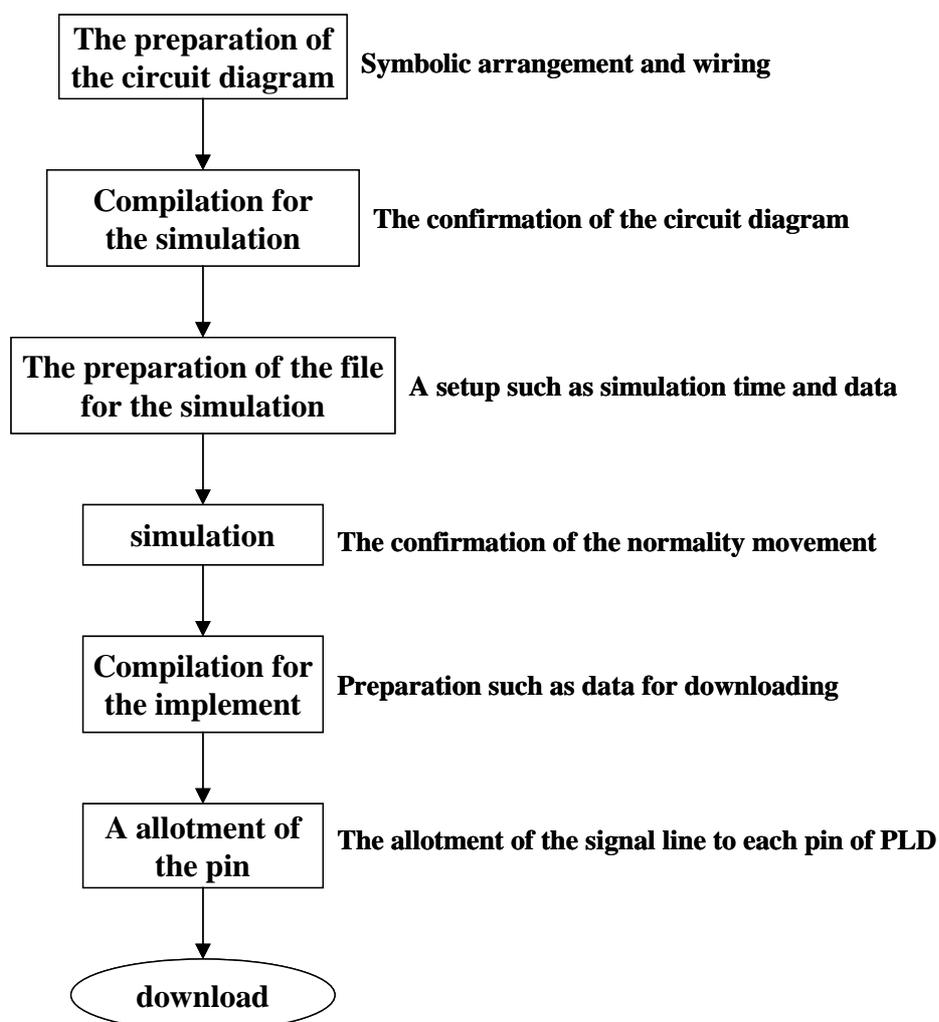


図 5.2 PLD 開発における作業の流れ

5.3 内部動作

ノードは C-Bridge から受け取ったコマンド・パケットのヘッダ情報を分析する。自分宛であればそれに応じた処理をし、さらにその先へと送られるコマンドであればそれらに対応するようヘッダを書き直した後、シリアル・リンク・インターフェイス IC へと送る。この時ノードはインターフェイス IC の出力ステータス・レジスタの状態を見てシリアル・リンクへの出力が可能であれば 1 バイトずつ送る。インターフェイス IC はこのデータを受信した後、出力ステータス・レジスタに出力禁止状態を表すフラグを立て、シリアル・リンクへと受け取ったデータを流す。出力バッファにデータがなくなればそのフラグをクリアする。この動作がパケットのサイズ分だけ繰り返される。

また、インターフェイス IC はシリアル・リンクからデータを受信すると入力ステータス・レジスタにデータの存在を示すフラグを立てる。このフラグは入力バッファの値が読み出されるとクリアされる。一方ノードは 1 ミリ秒毎にインターフェイス IC の入力ステータス・レジスタの状態を読み込み、データが存在していれば入力バッファを読みに行く。シリアル・リンクから最初に送られてくるのはサイズ情報であり、ノードはこのサイズを知ることによりメッセージの最後を判断する。受け取ったメッセージはその後 LON 用にパッケージ化され、C-Bridge へと送られる。

第 6 章 まとめ

6.1 動作テストと現状

具体的な性能評価は測定器に組み込み長時間の動作をさせ、各サブシステムとの通信が問題なく行えるかによって判断した。当初様々な問題が生じたがそれぞれに最適な対処を施し確実な動作を求めた。例として熱による問題がある。実際の測定器に組み込んで動作確認を行っていたが、熱試験を行っておらず、圧力容器を完全に密封するとハングしてしまった。原因は CPU 外部 EPROM に対するバスのアクセス・タイミングが熱により不安定になりプログラムの読み出しに不具合が生じたためである。C-Bridge はプログラムを CPU 外部の EPROM から読み出すことによって実行していたのだが、処理速度を最速に保つためにはプログラムの読み出しを早くする必要がある。そのためアクセス・タイミングを最も早いタイミングに設定していたが、このタイミングが高い温度で対応できず結果として誤動作を生じさせてしまった。プログラムを外部から読み出ししていたのでは、CPU の性能が外部バス能力によって制限されてしまい本来の性能を十分に発揮できない。そこでこの CPU の特徴である大容量の DRAM を活かし、起動時にプログラムを外部 EPROM から内蔵 DRAM に移した。これによって、プログラムの実行速度は外部バスによる制限を受けなくなる。その結果、当初問題であった熱によるアクセス・タイミングの不具合がなくなりより安定した動作を確認できた。また、Omninet を取り除くことでモニタ系にみられたような 2 つのプロトコルの混在がなくなり、当初の目的であったネットワークの簡素化が達成できた。これによりプロトコル処理における応答時間等が減り、システムとしてはより高速度で柔軟な動作が可能になったと言える。こういったいくつかの問題や課題を解決し、C-Bridge は 2001 年のフライトで搭載され合計 13.5 時間動作した。また消費電力は動作時で約 2W であり、この値は従来システムの約 10 分の 1 に相当する。しかし、いくつかの問題点がまだ残っており、現在デバッグを進行している。

6.2 将来計画

今回のフライトでは開発期間の問題から必要最低限の機能部分しかデバッグを進めておらず、前述したような PPP をサポートした IC やフラッシュ・メモリに対しては手をつけていない。これらのデバッグを行う事により、さらに柔軟性・汎用性に富んだシステムが期待される。PPP はパケットのフォーマットをハードウェアで管理してくれるので、自らがそれをソフトウェアで記述しなければならない UART より通信における信頼性が高い。そのため T-Pot との通信に生じていた不具合の解決策として使用でき、また今後、シリアル通信を用いたデバイスの追加に対応できる。

また現在は EPROM を用いてプログラムを動かしているが、これだとプログラムを修正する度に EPROM を取り出し、消去、書き込みといった作業をしなければならず、一旦圧力容器を閉めてしまったら修正は不可能である。しかし、C-Bridge にはフラッシュ・メモリが載っており、その周りに外部アクセス用の制御回路も備えているので、この部分を利用可能にすればプログラムをフラッシュ・メモリから実行することができる。そしてまた、圧力容器の外からケーブルを通して C-Bridge 内部のフラッシュ・メモリにアクセスする事により、いつでもプログラムの変更が可能となる。

さらに C-Bridge は電源投入時の自動リセットがかからずシステムが動作しないため、コマンドによりリセット信号を入力しなければならない。このような構成ではフライト中万が一リセット・ラインに問題が生じ、さらにその上システムまでも不具合を生じてしまっただけではどうにもならなくなってしまう。そのためリセット回路を付け加え電源投入時にシステムがブートしてくれるように改良する必要がある。こうすることでリセット・ラインに問題が生じたとしても、電源を入れ直すことでシステムを再び起動でき、状況はかなり改善する。

謝辞

BESS 実験における物理的意義や研究の指導にあたって頂いた野崎光昭教授に深く感謝致します。また本開発を進める上で、データ収集系のみならずハードウェア、ソフトウェアにおける様々な事柄を丁寧に指導して下さった松本浩氏、前野忠嗣氏、佐々木誠氏、谷崎圭祐氏、大和一洋氏、そして実験全般、測定器各部の詳細を教えて下さった山本明教授、吉田哲也助教授、佐貫智行助手、安部航氏、山本康史氏、灰野禎一氏には非常にお世話になりました。心より感謝いたします。

さらに武田廣教授、川越清似助教授、蔵重久弥助教授、原俊雄助教授、青木茂樹助教授をはじめとする神戸大学の皆様にも深くお礼を申し上げます。

その他グループ内外を問わず、ここには挙げられなかった皆様に感謝の意を表したいと思います。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] K. Yoshimura, et al. (BESS collaboration): Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 3792.
- [2] H. Matsunaga, et al. (BESS collaboration): Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 3792.
- [3] T. Maeno, et al. (BESS collaboration): astro-ph/0010381
- [4] S. W. Hawking: Nature 248 (1974) 30
- [5] G. Jungman and K. Kamionkowski: Phys. Rev. D46 (1994) 2316
- [6] J. W. Bieber, et al., Phys. Rev. Lett., 83 (1999) 674.
- [7] Y.Fukuda, et al.: Phys. Rev. Lett., 81 (1998) 1562.
- [8] M. Honda, T. Kajita, K. Kasahara, and S. Midorikawa, Phys. Rev. D, 52 (1995) 4985
- [9] M.J.Ryan, et al. : Phys. Rev. Lett., 12 (1972) 985.
- [10] I.P. Ivanenko, et al. : Proc. 23rd ICRC(Calgary), 2 (1993) 17.
- [11] E.S. Seo, et al. : Astro Phys. J, 378 (1991) 763.
- [12] P. Papini, et al. : Proc. 23rd ICRC(Calgary) 1 (1993) 579.
- [13] M. Boezio, et al. : Astro Phys. J, 518 (1999) 457.
- [14] W. Menn, et al. : Astro Phys. J, 533 (2000) 281.
- [15] T. Sanuki, et al. (BESS collaboration): Astro Phys. J, 545 (2000) 1135.
- [16] S. Orito: ASTROMAG Workshop (1987) KEK Report KEK87-19 111
- [17] A. Yamamoto, et al.: Adv.Space Res., 14 (1994) 75.
- [18] Y. Ajima, et al. (BESS collaboration): Nucl. Instr. Meth. A 443 (2000) 71.
- [19] Y. Shikaze, S. Orito, K. Yoshimura, et al.: Nucl. Instr. Meth. A 455 (2000) 596.
- [20] Y. Asaoka, K. Abe, K. Yoshimura et al.: Nucl. Instr. Meth. A 416 (1998) 236.
- [21] E. Barberis, et al.: IEEE NS 39 (1992) 740.
- [22] 灰野禎一：東京大学
修士論文，気球搭載用高精度ドリフトチェンバーの開発
- [23] 松井長隆：東京大学
修士論文，FADC データ高速収集装置の製作
- [24] 土岐仁謙：神戸大学
修士論文，気球搭載用超伝導スペクトロメータのための FADC Interface の開発

- [25] 上田郁夫：東京大学
修士論文，気球搭載用並列処理型データ収集システムの開発
- [26] 前野忠嗣：東京大学
修士論文，飛跡判別機能を備えた高速データ収集システムの開発
- [27] 大和一洋：神戸大学
修士論文，BESS 実験のための新データ収集装置の開発