

TALE 実験地表検出器のための  
新規無線 LAN モジュールを用いた  
制御・データ収集エレクトロニクスの開発

(Development of the control and data acquisition electronics  
with a new wireless LAN module for the surface detectors  
of the TALE experiment)

理学研究科

数物系専攻

小西翔吾

# 目次

第 1 章	“2nd knee” 領域の宇宙線	1
1.1	宇宙線	1
1.1.1	宇宙線のエネルギースペクトル	1
1.1.2	宇宙線の化学組成	3
1.1.3	宇宙線の加速機構	3
1.2	“2nd knee” 領域の宇宙線	5
1.2.1	銀河系内宇宙線から銀河系外宇宙線への遷移	5
1.2.2	宇宙線源分布の宇宙論的「進化」	6
1.3	空気シャワーと宇宙線観測	8
1.3.1	空気シャワー現象	8
1.3.2	空気シャワーの縦方向発達	9
1.3.3	空気シャワーの横方向分布	11
1.3.4	空気シャワー粒子の到来時刻分布	12
1.3.5	空気シャワーの観測方法	13
1.4	観測結果の現状	15
1.4.1	エネルギースペクトル	16
1.4.2	質量組成	16
第 2 章	TA Low Energy extension (TALE) 実験	21
2.1	TALE 実験の目的	21
2.1.1	銀河系内宇宙線から銀河系外宇宙線への遷移の検出	21
2.1.2	宇宙線源の進化の解明	21
2.2	TA 実験	21
2.2.1	TA 実験の大気蛍光望遠鏡	24
2.2.2	TA 実験の地表検出器	24
2.3	TALE 実験装置の概観	24
2.4	大気蛍光望遠鏡	24
2.5	地表検出器	26
2.5.1	地表検出器の基本構成	26
2.5.2	タワーの基本構成	29
2.5.3	データ収集サイクル	29
2.5.4	モニター情報とモニタリングシステム	32
第 3 章	TALE 実験用 SD のためのエレクトロニクス	35
3.1	CPU	35
3.1.1	アセンブラ部	36
3.1.2	メインプログラム	37

3.2	FPGA . . . . .	38
3.2.1	無線通信コンポーネント . . . . .	40
3.2.2	送信データ用バッファ . . . . .	40
3.2.3	受信データ用バッファ . . . . .	40
3.3	無線 LAN モジュール . . . . .	41
3.4	アクセスポイント . . . . .	46
<b>第 4 章</b>	<b>新規無線 LAN モジュールを用いた無線通信のためのファームウェア</b>	<b>48</b>
4.1	レッドパインの初期設定 . . . . .	48
4.2	タワーと SD 間の無線通信 . . . . .	49
4.3	通信不可状態からのデータ収集への復帰 . . . . .	50
4.4	空気シャワーアレイとしての運用試験 . . . . .	52
4.4.1	試験のセットアップ . . . . .	52
4.4.2	試験結果 . . . . .	54
4.5	長距離通信試験 . . . . .	54
4.6	タワーエレクトロニクスから PC への移行 . . . . .	58
<b>第 5 章</b>	<b>TALE 実験の現状とその性能</b>	<b>59</b>
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>64</b>

## 要旨

宇宙線物理学において、現在最も重要な問題の一つは宇宙線のエネルギースペクトルにおいて  $10^{17.5}$  eV 付近に見られる “2nd knee” と呼ばれる折れ曲がり構造である。

$10^{17}$  eV 付近のエネルギー領域では宇宙線の主成分は重い原子核であるという結果が出ており、また、Telescope Array (TA) 実験は  $10^{18.2}$  eV $\sim$  $10^{19.5}$  eV で宇宙線の主成分は陽子であるという結果を出している。銀河系内の天体で生成・加速が可能な宇宙線のエネルギーはたかだか  $10^{17}$  eV と考えられていること、“2nd knee” を境として宇宙線の組成が異なっていることから、この前後の宇宙線の起源は銀河系内から銀河系外へと移り変わっていることに対応しているのではないかと考えられている。

そこで、この興味深い “2nd knee” エネルギー領域の組成とエネルギースペクトルを精密に測定し、系内宇宙線から系外宇宙線への遷移と宇宙線源の密度と距離の変化を明らかにするために TA Low Energy extension (TALE) 実験が進んでいる。TALE 実験は TA 実験の観測するエネルギー範囲を低エネルギー側に拡張した実験で、TA 実験に隣接して、10 台の大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector, FD) と 103 台の地表検出器 (Surface Detector, SD) を設置する。SD は広い範囲に設置され、タワーと呼ばれる通信塔と無線通信することによりデータ収集を行う。

本研究では TALE 実験用に選定された無線 LAN モジュールに合わせて、SD 用エレクトロニクス内の CPU と FPGA のファームウェアを新たに開発し、TALE 実験用エレクトロニクスを作成した。選定された無線 LAN モジュールはホストインターフェイスに UART や SPI を採用しており、無線通信は一般的な TCP/IP プロトコルで行う。TA 実験で使用されている ADTEK 社製の無線 LAN モジュール ADLINK540F.RF は独自のプロトコルを使用したため、FPGA と無線 LAN モジュール間のインターフェース部分を大きく変更した。また、作成したエレクトロニクスを用いて米国ユタ州の TALE サイトにて空気シャワーアレイとしての運用試験を実施した。その結果、作成した SD エレクトロニクスは空気シャワーアレイとして使用できることが確認できた。しかし、タワーエレクトロニクスに関しては選定された無線 LAN モジュールを使用することはできないことがわかり、タワーエレクトロニクスで行っていた作業を PC などの他の媒体を用いて行う必要がある。そこでタワーエレクトロニクスの代わりに PC を用いて、データ収集を行うことにした。PC を用いたデータ収集プログラムの開発は既に進んでおり、現在 5 台の SD との TCP/IP 通信に成功している。さらに選定された無線 LAN モジュールとアクセスポイントを用いた長距離通信試験も実施した。試験の結果から TALE 実験の最長通信距離である 10 km よりも十分に長い 18 km での安定したデータ収集が可能であることがわかった。

TALE 実験用エレクトロニクスを使って TALE 検出器を完成させると、ハイブリッド事象の最頻エネルギーは  $10^{17.3}$  eV となり、これは “2nd knee” ( $10^{17.5}$  eV 付近) より低い。また、年間事象数 5000 イベントが期待でき、数年の観測からこのエネルギー領域のエネルギースペクトルと化学組成を明らかにする予定である。



# 第1章 “2nd knee” 領域の宇宙線

## 1.1 宇宙線

宇宙線は宇宙空間に存在する高エネルギー放射線であり、成分は約82%が陽子で、約11%が $\alpha$ 粒子、残りはそれより重い原子核である。宇宙線は1912年にオーストリアのV.F.Hessによって発見され、これまでに観測された宇宙線のエネルギーは $10^8$  eV から  $10^{20}$  eV 以上までの広範囲にわたっている。そして、その到来頻度はエネルギーのほぼ3乗に比例して小さくなることが知られている。(図1.1)

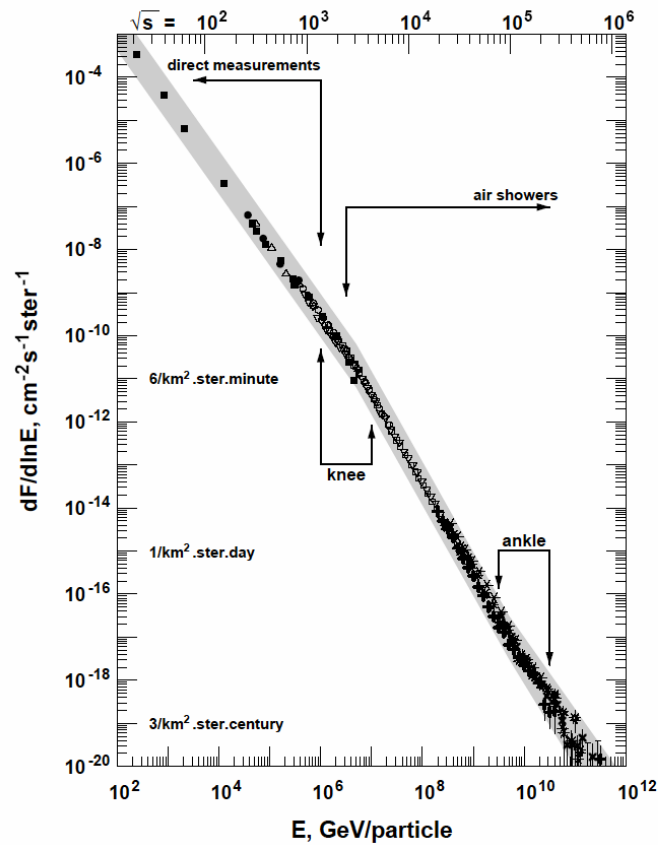


図 1.1: 一次宇宙線のエネルギースペクトル。

### 1.1.1 宇宙線のエネルギースペクトル

$10^{10}$  eV を越えるエネルギー領域では、地球で観測される宇宙線のエネルギースペクトルはエネルギーの冪乗  $F(E) = K \times E^{-\gamma}$  で近似される。 $10^{13}$  eV から  $10^{20}$  eV のエネルギー領域のフラッ

クスに  $E^3$  を掛けたものを図 1.2 に示す. 宇宙線の冪  $\gamma$  は  $10^{15}$  eV 付近までは  $\sim 2.7$  であり, そこから  $\gamma \sim 3.0$  と変化する. そして  $10^{17.5}$  eV 付近でさらに傾きが急になり,  $10^{18.5}$  eV 付近からまた  $\gamma \sim 2.7$  となる. これら 3 つのスペクトルの折れ曲がりをそれぞれ “knee”, “2nd knee”, “ankle” と呼んでいる.

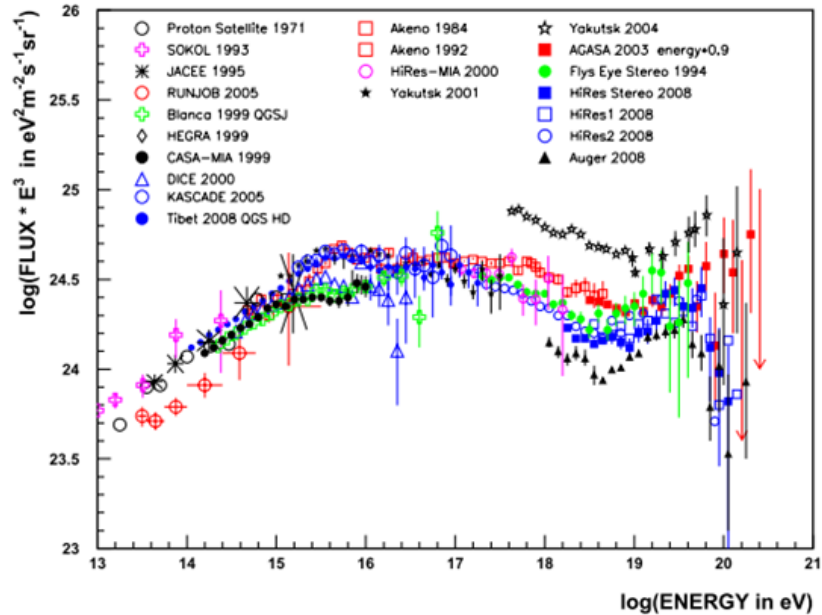


図 1.2: 一次宇宙線のエネルギースペクトル.  $10^{15}$  eV,  $10^{17.5}$  eV,  $10^{18.5}$  eV 付近に構造があるのが分かる. [1]

knee より低いエネルギー領域の宇宙線は, 超新星残骸の衝撃波で加速されると考えられている. また,  $10^{15}$  eV 以上のエネルギー領域では別の機構, 例えば, 超新星爆発の磁場がもっと強い場合や, 恒星とコンパクト星 (中性子星やブラックホール) との連星などで宇宙線が生成, 加速されているという可能性も指摘されている.

knee でのスペクトルの折れ曲がりの原因には全く別の考え方もある. それは, このエネルギー以上では荷電粒子のラーモア半径  $r_L$  が銀河円盤の厚さよりも大きくなるため, 粒子が銀河円盤の外に逃げ出していく効果が現れる, というものである. 銀河磁場は約  $3 \mu\text{G}$  なので,  $10^{15}$  eV の陽子では  $r_L \sim 0.3 \text{ pc}$  となる. この値は銀河円盤の厚さより小さいが, 銀河風の効果を合わせると, これ以上のエネルギーを持つ宇宙線に対しては銀河系内への閉じ込め効果が効きにくくなるため, エネルギースペクトルの冪が大きくなるとする考えである [2].

ankle 領域のエネルギーの宇宙線についても複数のモデルがある. 1 つは knee と同様に宇宙線に対して銀河内への閉じ込め効果が効きにくくなることで十分に加速できなくなり, 銀河系内起源の宇宙線から銀河系外起源の宇宙線へと遷移するという考え方である. この場合は ankle 周辺での宇宙線の到来方向に銀河円盤に対する異方性が検出され, 化学組成は系内起源の宇宙線から系外起源の宇宙線への変化に伴って, 1 次エネルギーの増加とともに重い原子核から陽子や軽い原子核へと変化していると期待される. 他には, ankle 構造が宇宙線と宇宙背景放射との相互作用, すなわち  $p\gamma \rightarrow pe^+e^-$  の対生成によるエネルギー損失によって生じるという解釈もある. このとき化学組成は ankle をはさんだ高エネルギー側, 低エネルギー側どちらでも陽子のままで変化しないと予想される. この場合,  $10^{17.5}$  eV 付近の “2nd knee” で系内宇宙線から系外宇宙線に変化

していると考えられ、それに伴って化学組成は変化していると予測される。

### 1.1.2 宇宙線の化学組成

宇宙線の化学組成は、宇宙の化学組成と比べると重い元素がH, Heに比べて相対的に多い。これはH, Heが加速領域に入る際に比較的イオン化されにくいことと関係があると考えられている。しかし、大まかに見ると宇宙線の化学組成と、宇宙の化学組成は一致している。原子核は星の中で核融合によって合成され、星風や爆発によって星間物質となり、再び凝縮して星となる。この過程を繰り返して、宇宙の化学組成を形成している。つまり、宇宙線の化学組成が宇宙の化学組成から大きくずれていないのは、星の中で合成された原子核が何らかの形で加速されて宇宙線となっていることを示している。宇宙線の化学組成には、宇宙線の原子核の合成、加速、伝播がどのように起こっているのかが反映されているはずである。従って、宇宙線中の放射性同位体比や重元素比を知ることによって、宇宙線の起源について知ることができる。

### 1.1.3 宇宙線の加速機構

宇宙線の加速機構についても多くの議論がなされている。宇宙線の加速機構を考える上で、先に述べたような冪型のエネルギースペクトルを導き出すことが必須条件となる。現在、この条件を満たす加速機構として最も有力とされているのが“フェルミ加速機構”である [3]。

#### フェルミ加速

フェルミ加速は1949年にFermiによって提唱された荷電粒子加速理論で、荷電粒子が磁場を持った星間雲との衝突を繰り返すことによって運動エネルギーを得るという統計的な加速モデルである。これによれば、星間雲と荷電粒子の衝突方向は統計的にランダムであるが、1回の衝突あたりの粒子の平均的なエネルギー増加量 $\Delta E$ は正であり、 $\Delta E = \alpha E$ と粒子のエネルギーに比例することが示される。星間雲との衝突による加速はこの $\alpha$ が星間雲の移動速度の2乗に比例することから、2次のフェルミ加速と呼ばれる。実際の宇宙線加速モデルとしては、この2次フェルミ加速よりもプラズマ衝撃波による加速が有力であると考えられている。この場合、加速領域の形状の考察から $\alpha$ が衝撃波の移動速度の1乗に比例することが示され、1次のフェルミ加速と呼ばれる。荷電粒子が衝撃波との1回の衝突で $\Delta E = \alpha E$ のエネルギーを獲得するとすると、 $n$ 回の衝突後の粒子のエネルギー $E_n$ は以下ようになる。

$$E_n = E_0 (1 + \alpha)^n \quad (1.1)$$

ここで、 $E_0$ は粒子の初期エネルギーである。よって、エネルギーが $E$ になるのに必要な衝突回数は、

$$n = \frac{\ln(E/E_0)}{\ln(1 + \alpha)} \quad (1.2)$$

となる。ここで、1回の衝突で加速領域から逃げ出す確率を $P_{\text{esc}}$ とおけば、 $n$ 回衝突後に加速領域に留まる確率は $(1 - P_{\text{esc}})^n$ であるので、 $E$ 以上のエネルギーに加速される粒子の割合は、

$$N(\geq E) \propto \sum_{m=n}^{\infty} (1 - P_{\text{esc}})^m = \frac{(1 - P_{\text{esc}})^n}{P_{\text{esc}}} \quad (1.3)$$

である。式 (1.2) を式 (1.3) に代入すると、

$$N(> E) \propto \frac{1}{P_{\text{esc}}} \frac{E^{-\gamma}}{E_0} \quad (1.4)$$

となる。ここで、

$$\gamma = \frac{\ln [(1 - P_{\text{esc}})^{-1}]}{\ln(1 + \alpha)} \approx \frac{P_{\text{esc}}}{\alpha} \quad (1.5)$$

である。このようにしてフェルミ加速では冪型のエネルギースペクトルが導き出される。

### ボトムアップモデル

フェルミ加速あるいはその他のメカニズムによって、低いエネルギーの宇宙線をより高いエネルギーへと加速する放射源モデルを総称してボトムアップモデルと呼ぶ。

前述の計算とは異なり、寿命が十分長い衝撃波による加速を考える。荷電粒子の進行方向を曲げるのは磁場であるから、加速領域への閉じ込め条件から加速されるエネルギーの限界が決まり、

$$E_{\text{max}} \leq cZeBR \quad (1.6)$$

となる。ここで、 $Z$  は宇宙線原子核の原子番号、 $B$  は加速領域の磁場の強さ、 $R$  は加速領域の大きさである。図 1.3 に、宇宙線源候補天体の大きさと磁場強度、そして最大加速エネルギーの関係を示した [4]。この図から、ほとんどの銀河系内天体 (ガンマ線バースト、中性子星が例外) は  $10^{18}$  eV 以上のエネルギーをもつ極高エネルギー宇宙線の加速源候補となりえないことがわかる。銀河系外の候補天体は活動銀河核、ガンマ線バースト、電波銀河、銀河団などが挙げられる。

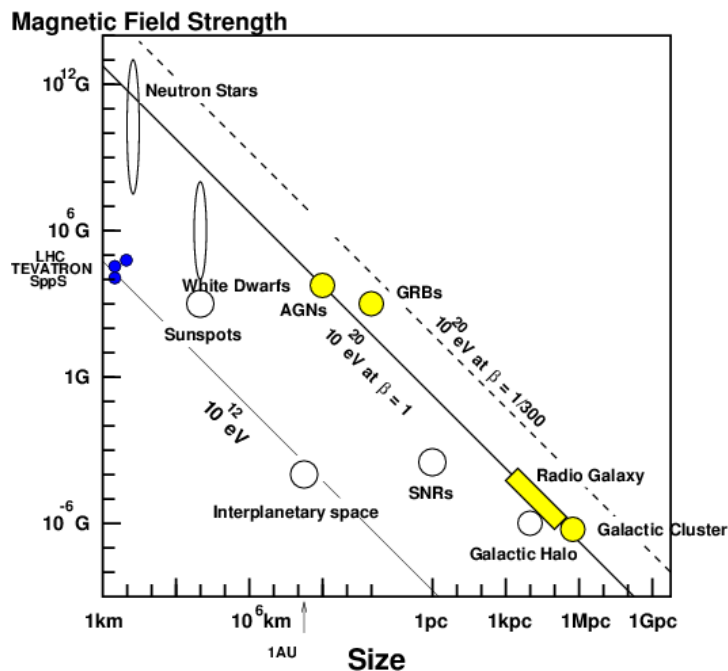


図 1.3: 磁場の強さと天体の大きさと最大加速エネルギーの関係 (Hillas プロット)[4].

以下、候補天体での加速と観測される特徴について簡単にまとめる。

- 中性子星：表面の磁場が  $10^{13}$  G を越えるような中性子星は、鉄原子核を  $10^{20}$  eV 以上まで加速することが原理的には可能である。しかし、このような非常に強い磁場が存在すると、荷電粒子はシンクロトロン放射によってエネルギーを失い、そのような高エネルギーまでの加速は不可能であると考えられている。ただし、シンクロトロン放射によるエネルギー損失率は中性子星表面からの距離に強く依存し、表面から  $10^9$  cm 以上離れた領域で加速された粒子は大きなエネルギー損失を伴わず外部へ脱出できるという考えもある [5]。このモデルが正しければ、極高エネルギー宇宙線の到来方向分布は銀河面に集中し、鉄原子核が主成分となるはずである。
- GRB：ガンマ線バースト (Gamma Ray Bursts, GRB) は、既知の天体現象の中でも最も激烈なものの一つであり、等方的に分布している。GRB は陽子を  $10^{20}$  eV まで加速できる可能性があると考えられており、さらに  $10^{19}$  eV 以上の宇宙線に対するエネルギー放出率の観点からも有力な候補天体であると考えられている [6]。しかし、GZK 機構のために地球近傍 50 Mpc 以内に存在しなければならない。このような GRB は 100 年に 1 回程度しか発生しないと予想されているので、観測される宇宙線の到来方向分布は GRB の方向に集中することが予想できる。
- AGN：活動銀河核 (Active Galactic Nuclei, AGN) では、中心にあるブラックホールに降着する物質の重力エネルギーをなんらかのメカニズムで粒子の運動エネルギーに変換して解放している。ただし、AGN での加速では、その周囲の放射場との衝突による荷電粒子のエネルギー損失が顕著であり、最大加速エネルギーは  $10^{19}$  eV までと考えられている [7]。

## トップダウンモデル

前述のように、これまでに観測された極高エネルギー宇宙線を既知の天体現象や素粒子物理、宇宙論の標準的な枠組の中で説明するのではなく、素粒子物理の標準理論を越えた新しい物理に基づくモデルや、未知の超高エネルギー天体現象に基づくモデルが提案されている。こうしたモデルは、従来のような低エネルギー粒子が加速されて極高エネルギーに達するというボトムアップモデルに対して、トップダウンモデルと呼ばれる。

## 1.2 “2nd knee” 領域の宇宙線

宇宙線物理学において、現在最も重要な問題の一つは“2nd knee”である。“2nd knee”とは図 1.2 に示されるエネルギースペクトルの  $10^{17.5}$  eV 付近に見られる折れ曲がり構造である。この節では“2nd knee”領域の宇宙線が持つ重要な項目についていくつか説明する。

### 1.2.1 銀河系内宇宙線から銀河系外宇宙線への遷移

$10^{15.5}$  eV 付近の knee とそれより高いエネルギーでの空気シャワー観測から、一次宇宙線の平均質量数が徐々に大きくなり、宇宙線の主成分がエネルギーの増加とともに重い元素へ移行していく様子が示されている。これは 1.1 節で述べたように、加速領域あるいは閉じ込め領域からのみれ出しによるもので、電荷の小さな原子核ほど閉じ込めが効かず、結果としてフラックスが減少していく。 $10^{15.5}$  eV での knee が陽子によるものであるならば、そこからヘリウム、炭素、の順で

フラックスが減少していき、knee よりも 26 倍高いエネルギー、すなわち  $\sim 10^{17}$  eV 付近では主成分が鉄となり、折れ曲がり “iron knee” が観測されるはずである。

よって、銀河系内から銀河系外への遷移が起きているエネルギー領域では、宇宙線の主成分が重い原子核から軽い原子核へ極端に変化する。この遷移領域では、 $X_{\max}$ (空気シャワーの最大発達深さ) がエネルギーとともに急激に変化し、さらにその分布が鉄成分と陽子成分の両方を含むため、非常に広くなるはずである。このような  $X_{\max}$  とその分布幅のエネルギーに依存した変化が見つかれば、宇宙線源の銀河系内から銀河系外への遷移の決定的な証拠になると考えられている。

### 1.2.2 宇宙線源分布の宇宙論的「進化」

高エネルギーの宇宙線は、主に宇宙の膨張と宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR) との相互作用によってそのエネルギーを失う。これらのエネルギー損失過程は、宇宙線源から地球への伝搬距離によるため、観測されるエネルギースペクトルには、距離毎の宇宙線発生源の密度の違いを反映した各種の構造が見られると予想される (図 1.4, [8]).

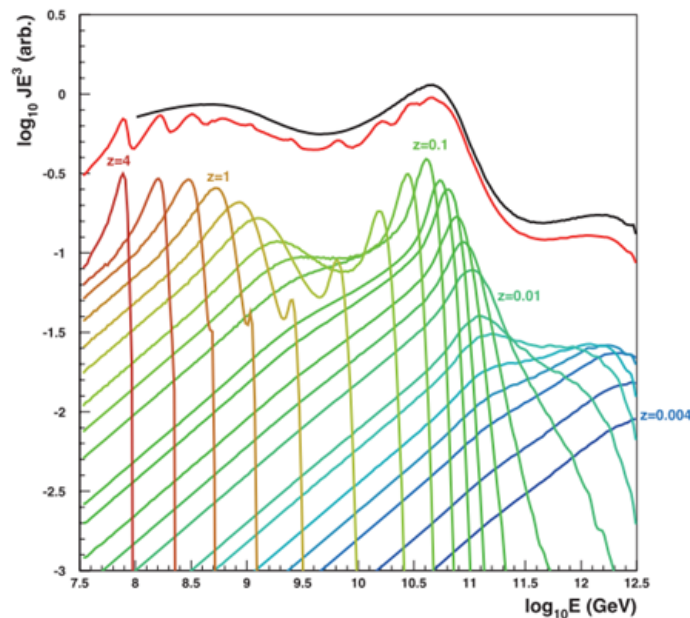


図 1.4: 各エネルギーで宇宙線フラックスに寄与する宇宙線源の赤方偏移量  $z$ [8].

このスペクトルの構造を宇宙線伝搬シミュレーションと比較することによって、宇宙線源の空間密度の赤方偏移依存性、 $\rho \propto (1+z)^m$  の evolution parameter  $m$  が求められる。図 1.5 は宇宙線のエネルギースペクトルの構造へのスペクトルインデックスの変化の寄与と、 $m$  の変化の寄与を示したものである。 $10^{19}$  eV 半ば付近の形状はスペクトルインデックスに強く依存し、 $10^{18.7}$  eV のすぐ下のエネルギー領域は  $m$  に強く依存することが予想されている [8]。このため、“2nd knee” 領域の宇宙線のエネルギースペクトルを詳しく調べることによって、これらの重要なパラメータを個別に制限することが出来る。これによって「エネルギースペクトル」「質量組成」「到来方向分布」という観測量に加えて、宇宙線源の研究のための新しい「進化」という座標軸を切り開くことが出来る。

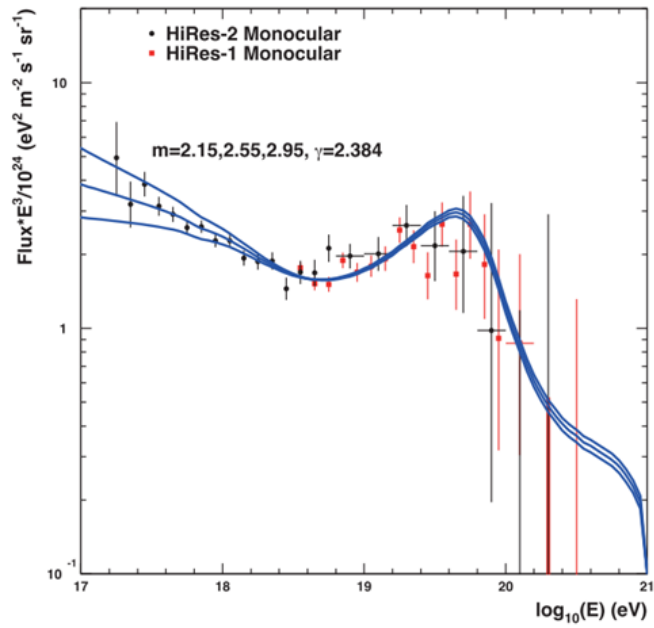
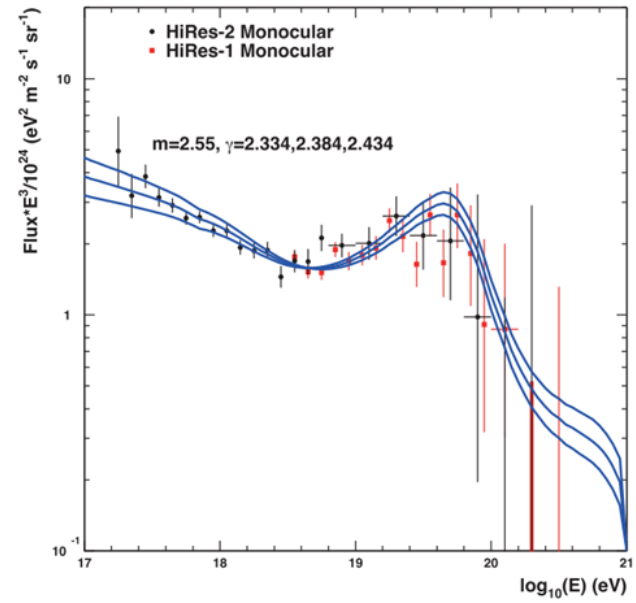


図 1.5: 極高エネルギー領域におけるエネルギースペクトルの構造へのスペクトルインデックスの変化の寄与(上), evolution parameter( $m$ )の寄与(下). スペクトルインデックスの違いは, GZK 領域, “2ndknee” 領域の両方に現れるのに対して,  $m$ の違いは “2nd knee” 領域で顕著であることがわかる [8].

### 1.3 空気シャワーと宇宙線観測

1.1節で述べたように、宇宙線のフラックスはほぼ  $E^{-3}$  で減少する。フラックスの大きい  $10^{14}$  eV 以下の低エネルギー宇宙線は、気球や人工衛星などの飛翔体に搭載された観測装置によって直接観測される。しかし  $10^{14}$  eV 以上の高エネルギー宇宙線は到来頻度が少ないため、観測には大きな検出面積と長い時間が必要であり、そのため飛翔体搭載検出器によって直接観測をすることは難しい。そこで、高エネルギー宇宙線に対しては一次宇宙線が大気と相互作用してできる二次宇宙線(空気シャワー)を地表で検出するという間接観測が行われている。

#### 1.3.1 空気シャワー現象

宇宙線が大気に入射すると、大気中の原子核と相互作用して二次粒子を生成する。さらにそれらの二次粒子も粒子生成を行なう。この過程をくり返し、一次宇宙線が大量の二次粒子群となる現象を空気シャワー現象と呼ぶ。

宇宙線の主成分である陽子などの原子核が大気原子核と相互作用した場合には、 $\pi$ 、K などのハドロンの多重生成(核カスケード)が起きる。生成された二次粒子の大部分は結果的に  $\pi$  となる。そのうち  $\pi^0$  は短い寿命 ( $8.4 \times 10^{-17}$  s) で 2 個のガンマ線に崩壊し、電磁カスケードを形成する。 $\pi^\pm$  の寿命は  $2.60 \times 10^{-8}$  s で、

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \quad (1.7)$$

のように崩壊する。 $\mu^\pm$  の寿命は  $2.20 \times 10^{-6}$  s で、

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1.8)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (1.9)$$

のように崩壊する。大気の厚みは核相互作用の平均自由行程の約 10 倍であるため、相互作用が繰り返されることで多数の粒子が生成される。図 1.6 はこの様子を模式的に表したものである。

高エネルギーのガンマ線は電子対生成により電子と陽電子を作る。これらの電子、陽電子は制動放射によってガンマ線を放射する。エネルギー  $E$  の電子による制動放射の断面積  $\sigma_{\text{brems}}$  は、次の Bethe-Heitler の式で表される。

$$\sigma_{\text{brems.}}(E, \nu) d\nu = \frac{4Z^2 r_e^2}{137} \frac{d\nu}{\nu} \left[ \left( 1 + (1 - \nu)^2 - \frac{2}{3}(1 - \nu) \right) \ln \left( 184Z^{-\frac{1}{3}} \right) + \frac{1}{9}(1 - \nu) \right] \quad (1.10)$$

ここで、 $\nu$  は  $h\nu/E$ 、 $\nu$  は制動放射される光子の振動数、 $Z$  はターゲットとなる原子核の原子番号、 $r_e$  は古典電子半径である。制動放射による単位厚さ当たりのエネルギー損失  $(dE/dX)_{\text{brems.}}$  は以下のように表される。

$$\left( \frac{dE}{dX} \right)_{\text{brems.}} \simeq -\frac{E}{X_0} \quad (1.11)$$

ここで、 $X_0$  は電子のエネルギーが  $1/e$  になる厚さで放射長と呼ばれ、以下のように定義される。

$$\frac{1}{X_0} = \frac{4Z^2 r_e^2 N}{137 A} \ln \left( 184Z^{-\frac{1}{3}} \right) \quad (1.12)$$

ここで、 $N$  はアボガドロ数、 $A$  はターゲット原子核の質量数である。 $X_0$  は大気ではおよそ  $38 \text{ g/cm}^2$  である。一方、電子対生成の断面積  $\sigma_{\text{pp}}$  は、

$$\sigma_{\text{pp}}(h\nu, u) du = \frac{4Z^2 r_e^2}{137} du \left[ \left( u^2 + (1 - \nu)^2 - \frac{2}{3}(1 - \nu) \right) \ln \left( 184Z^{-\frac{1}{3}} \right) + \frac{1}{9}(1 - u) \right] \quad (1.13)$$



となる。ここで、 $u = E/h\nu$ ,  $E$  は生成される電子のエネルギーをあらわす。この断面積から電子対生成の interaction length が求められ、結果として輻射長を使って、

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{pair}} = -\frac{7}{9} \frac{E}{X_0} \quad (1.14)$$

となる。従って、電子対生成と制動放射の interaction length は同程度であることがわかる。この二つの過程を繰り返して、多数の電子、陽電子、ガンマ線がつくられる現象が電磁カスケードである。粒子数が増大し1粒子あたりのエネルギーが減少すると、大気中での電離損失が優勢となり、電子成分が大気に吸収されて粒子総数が減少する。この境目のエネルギーを臨界エネルギーと呼び、空気中では 84 MeV である。

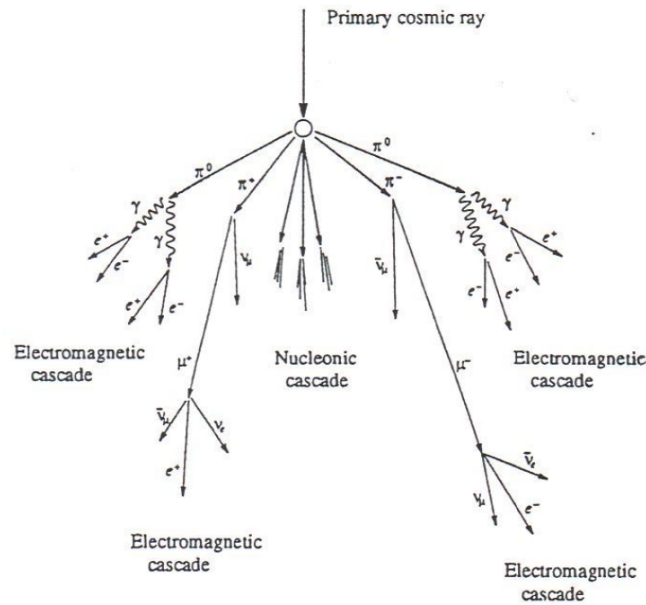


図 1.6: 空気シャワーの模式図.

### 1.3.2 空気シャワーの縦方向発達

空気シャワー中に含まれる粒子の総数が増大するにつれて、個々の粒子の持つエネルギーは減少する。高エネルギーの電子は主に制動放射によって急速にエネルギーを失っていくが、電離損失が支配的になる臨界エネルギー  $E_c$  (空気中では  $E_c=84$  MeV) にまでエネルギーが下がると、もはや制動放射が起こらなくなるため、シャワー中の粒子の総数はある段階で現象に転じる。このようなシャワーの通過した物質質量に対する粒子数の変化は縦方向発達 (longitudinal development) と呼ばれる。

エネルギー  $E_0$  の1個のガンマ線が大気に入射したときに生じる空気シャワーの縦方向発達については、次の近似式が用いられる。

$$N_e(t) \sim \frac{0.31}{\sqrt{y}} \exp \left[ t \left( 1 - \frac{3}{2} \ln s \right) \right] \quad (1.15)$$

$$y = \ln \left( \frac{E_0}{E_c} \right) \quad (1.16)$$

$$s = \frac{3t}{t + 2y} \quad (1.17)$$

ここで、 $t$  は電子の大気中での輻射長  $38 \text{ g/cm}^2$  を単位とするシャワーが通過した大気厚さであり、 $s$  はシャワーの発達段階を表すパラメータでエイジパラメータと呼ばれる。このシャワーエイジは  $N_e$  (全電子・陽電子数) が最大になるとき、 $s = 1$  となる [3]。

宇宙線陽子がつくる空気シャワーについては、Gaisser と Hillas の提案に基づく以下の式が用いられることが多い。

$$N_e(X) = N_{\max} \left( \frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X_0}{\lambda}} \exp \left( -\frac{X_{\max} - X}{\lambda} \right) \quad (1.18)$$

ここで、 $N_{\max}$  は最大発達時の粒子数、 $X_{\max}$  はシャワー最大発達深さ [ $\text{g/cm}^2$ ]、 $X_0$  は一次宇宙線の最初の相互作用点の深さ [ $\text{g/cm}^2$ ]、 $\lambda$  は縦方向発達の attenuation length で  $70 \text{ g/cm}^2$  である。

一次宇宙線のエネルギーの違いは  $N_{\max}$  の違いとなって現れ、およそ  $N_{\max} \sim 2 \times E_0 \times 10^{-9}$  ( $E_0$  は一次宇宙線のエネルギー、単位：eV) の関係がある。また、同一の一次エネルギーである場合、一次宇宙線の粒子種の違いは  $X_0$ 、 $X_{\max}$  に現れ、重い原子核ほど  $X_0$ 、 $X_{\max}$  の値が小さくなる傾向がある。これは、重い原子核ほど大気との相互作用断面積が大きいため、より上空で発達が始まること、さらに核子当たりのエネルギーが小さいため、エネルギー細分化が早く進むことが原因である。単純なモデル計算から、 $X_{\max} \propto \ln(E_0/A)$  ( $A$  は一次宇宙線の質量数) の関係があることが示される。陽子、鉄原子核による空気シャワーをシミュレーションして求めた縦方向発達曲線を図 1.7 に示す。

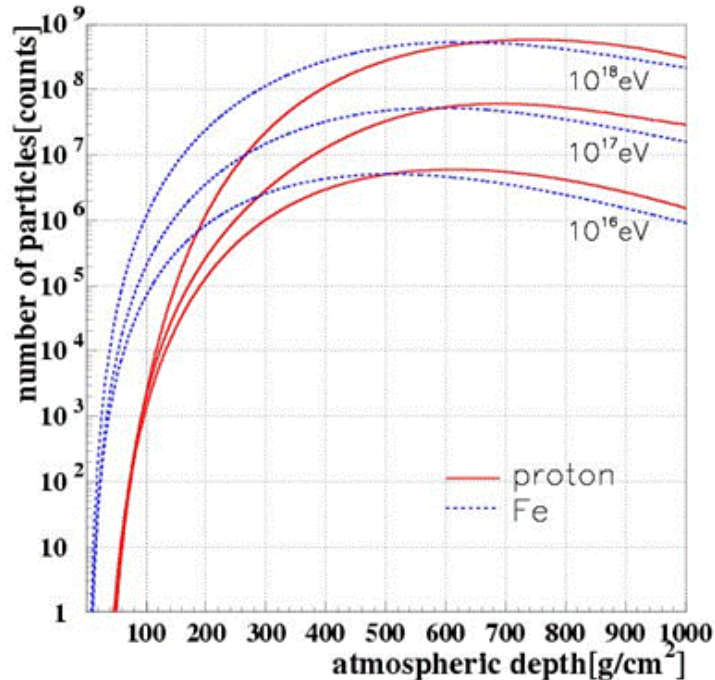


図 1.7: 空気シャワーの縦方向発達。

### 1.3.3 空気シャワーの横方向分布

電磁カスケードは大気中で電子の多重クーロン散乱により横方向に広がっていく。電磁カスケードの横方向分布は西村と鎌田によって解析的に求められ [9], Greisen により整理された NKG function が一般的に使われる [10]. 空気シャワーの中心からの距離  $R$  の位置での電子数密度  $\rho_e(R)$  は次式で表される.

$$\rho_e(R) = C \frac{N_e}{R_M^2} \left( \frac{R}{R_M} \right)^{s-2.0} \left( 1 + \frac{R}{R_M} \right)^{s-4.5} \quad (1.19)$$

ここで,  $N_e$  は総荷電粒子数,  $C$  は規格化定数,  $s$  はエイジパラメータ,  $R_M$  はモリエールユニットである. モリエールユニットは, 電子が  $X_0$  進む間にクーロン散乱により最初の進行方向とは垂直の方向にずれた距離 (厚さ) であり,  $R_M \sim 9.3 \text{ g/cm}^2$  である.

ハドロンにより引き起こされる空気シャワーは純粋な電磁カスケードとは少し様相が異なる. ハドロンにより引き起こされる空気シャワーの電磁成分は, 核相互作用によって生成された多世代の  $\pi_0$  の崩壊からの電磁カスケードの重ね合わせである. シャワーの中心部は核カスケードが発達する過程で次々に生成される  $\pi_0$  の崩壊による発達途上の電磁カスケードが主成分である. それに対し, シャワー軸から離れたところでは核カスケードの初期段階で生成された  $\pi_0$  の崩壊による粒子の増殖が終わった電磁カスケードが主成分となる. このため, シャワー中心から遠く離れた場所での横方向分布は, NKG function の外挿により得られる分布よりフラットになることが予想される. このシャワー中心から遠方での横方向分布を考慮した式が Linsley により与えられている [11]. シャワー中心からの距離  $R$  における電子数密度  $\rho_e(R)$  は

$$\rho_e(R) \propto \left( \frac{R}{R_M} \right)^{-\alpha} \left( 1 + \frac{R}{R_M} \right)^{-(\eta-\alpha)} \quad (1.20)$$

と表される. AGASA グループは, 電子成分の横方向分布は 1 km 以遠で粒子数密度が減少しているので, 式 (1.20) ではその構造を十分に表すことができず, 横方向分布に以下のように補正項を加えるべきであることを示した [11].

$$\rho_e(R) = C \left( \frac{R}{R_M} \right)^{-1.2} \left( 1 + \frac{R}{R_M} \right)^{-(\eta-1.2)} \left( 1.0 + \left( \frac{R}{1[\text{km}]} \right)^2 \right)^{-\delta} \quad (1.21)$$

次に空気シャワー中のミューオンの横方向分布について述べる. 高エネルギーミューオンは, 上空でのハドロン相互作用の情報を持っているが, その多くはコア近傍 ( $\sim$  数 10 m) に集中している. しかし一般に観測有効面積を大きくとる必要のある大規模な空気シャワーアレイによる観測では高エネルギーミューオンの観測は難しく, 遠方まで広がる低エネルギーミューオン ( $\sim 1 \text{ GeV}$  領域) が観測対象となる. その横方向分布は Greisen による以下の実験式で表される [12].

$$\rho_\mu(\geq E_\mu, R) = g(E_\mu, R) \frac{N_\mu C_\mu}{R_0^2} \left( \frac{R}{R_0} \right)^{-\alpha} \left( 1.0 + \frac{R}{R_0} \right)^{-\delta} \quad (1.22)$$

$$C_\mu = \frac{\Gamma(\beta)}{2\pi\Gamma(2-\alpha)\Gamma(\alpha+\beta-2)} \quad (1.23)$$

$$g(E_\mu, R) = [51/(50 + E_\mu)][3/(2 + E_\mu)]^{0.14R^{0.17}} \quad (1.24)$$

$$\alpha = 0.75, \beta = 2.5 \quad (1.25)$$

ここで,  $E_\mu$  はミューオンのエネルギー閾値,  $N_\mu$  は総ミューオン数,  $R_0$  はミューオンの平均的な広がりを示す距離である.

いくつかのエイジにおける横方向分布を図 1.8 に示した.

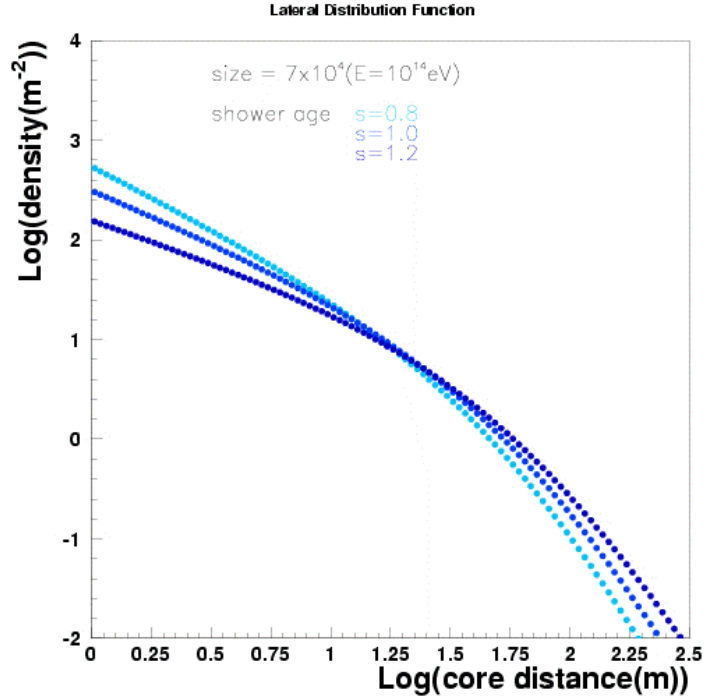


図 1.8: 空気シャワーの横方向分布.

#### 1.3.4 空気シャワー粒子の到来時刻分布

図 1.9 に空気シャワー断面の概略図を示す. 地表へのシャワー粒子の到来時刻はシャワー軸からの距離に応じてシャワー平面 (シャワー軸に垂直でシャワー軸上のシャワー粒子を含む仮想平面) に時間差が生じる. また, シャワーフロントは厚みを持っているため, その厚みも考慮する必要がある. 粒子の平均到来時刻分布  $\langle\sigma_t\rangle$  は Linsley により実験的に与えられており, シャワー中心からの距離を  $R$ , 空気シャワーの天頂角を  $\theta$ , 一次粒子のエネルギーを  $E$  として次式で表される [13].

$$\langle\sigma_t\rangle = \sigma_{t_0} \left(1 + \frac{R}{R_t}\right)^b \quad (1.26)$$

ここで,  $\sigma_{t_0}=1.6$  ns,  $R_t=30$  m,  $b = (2.08 \pm 0.08) - (0.40 \pm 0.06)\sec\theta + (0 \pm 0.06)\log(E/10^{17} \text{ eV})$  である.

この関数は AGASA グループにより改良されており, シャワー平面に対するシャワー粒子の遅れの平均  $T_D$  と, その標準偏差  $T_S$  は

$$T_D(\rho, R) = 2.6 \left(1 + \frac{R}{3000[\text{cm}]}\right)^{1.5} \rho^{-0.5} \times 10^{-9}[\text{sec}] \quad (1.27)$$

$$T_S(\rho, R) = 2.6 \left(1 + \frac{R}{3000[\text{cm}]}\right)^{1.5} \rho^{-0.3} \times 10^{-9}[\text{sec}] \quad (1.28)$$

で表される [14]. ここで,  $\rho$  は粒子数密度  $[\text{m}^{-3}]$  である.

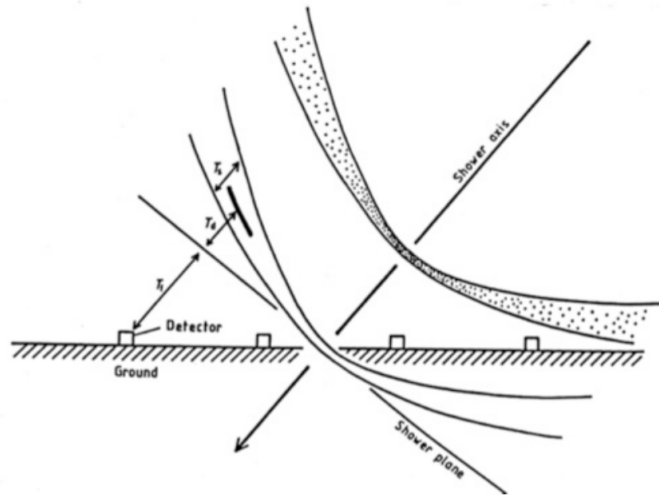


図 1.9: 地表付近の空気シャワー断面の概念図.

### 1.3.5 空気シャワーの観測方法

現在の空気シャワーの観測方法は大きく分けて、大気蛍光を用いた観測と地表粒子検出器による観測の2種類がある。

#### 大気蛍光を用いた観測

大気蛍光を用いた観測では、空気シャワー粒子の電離損失の一部が光に変換されることを利用する。高エネルギーの荷電粒子が大気中を通過すると、その軌跡の近傍にある窒素などの大気分子は励起され、励起された大気分子から蛍光が発せられる。すなわち、大気は宇宙線に対してシンチレータとして働く。80 MeV の電子が1気圧の大気中を1m通過した場合に発せられる大気蛍光光子数はおよそ4個であるが、一次宇宙線のエネルギーが $10^{20}$  eVの場合、膨大なシャワー粒子数のために全体での光子数は $2 \times 10^{15}$ 個にも達し、その発光の継続時間は $30 \mu\text{s}$ 程度になる。これを光学望遠鏡で集光し高感度で高速の光センサーカメラで撮像すれば、およそ30 km遠方からでも観測することができる。さらに大気蛍光の放射は等方的であるため一次宇宙線の到来方向によらず観測を行うことができるという利点がある。この大気蛍光を用いた観測方法は、1960年代初めに菅などによって提案され、1968年に原、棚橋らによって初めて検出された。

大気蛍光を用いた観測による一次宇宙線の各種情報の推定は、大きく分けて

1. 空気シャワー軸の再構成
2. 空気シャワーの縦方向発達の再構成

の2段階を経て行われる。宇宙線の到来方向(=シャワー軸)は蛍光の軌跡から簡単に求めることができる。特に、遠く離れた2台の望遠鏡でシャワーをステレオ観測すると、それぞれの望遠鏡が決めたシャワー平面の交差した線がシャワー軸となる(図1.10)。空気シャワー軸を決定した後、さらに次のような手順で空気シャワーの縦方向発達の再構成をする。

- i. 空気シャワー中の電子1個から光電子増倍管に到達する光子数の期待値を，その電子の空間的な位置，望遠鏡までの距離から大気による散乱・吸収，装置の検出効率などを考慮して計算する．この光子数には大気蛍光だけでなく，チェレンコフ光も考慮する．
- ii. 実際に光電子増倍管で検出された光電子数と i. で計算される値を比較し，空気シャワーの各発達点での電子数を見積もり，式 (1.18) と比較することでシャワー発達曲線  $N_e(X)$  を求める．

空気シャワーが地表に到達するまでに失うエネルギーの 90% 以上は，シャワー中の電子成分の電離損失によるものであるので，求められたシャワー発達曲線  $N_e(X)$  から式 (1.29) により一次宇宙線のエネルギー  $E_0$  が決まる．

$$E_0 = \frac{\epsilon_0}{X_{\text{rad}}} \int N_e(X) dX \quad (1.29)$$

ここで， $X_{\text{rad}}$  は大気中での輻射長で  $38.0 \text{ g/cm}^2$ ， $\epsilon_0$  は大気に対する臨界エネルギーで  $84 \text{ MeV}$  である．また，シャワーの縦方向発達の様子 (特に最大発達深さ  $X_{\text{max}}$ ) から，一次粒子の質量組成の測定が可能である．

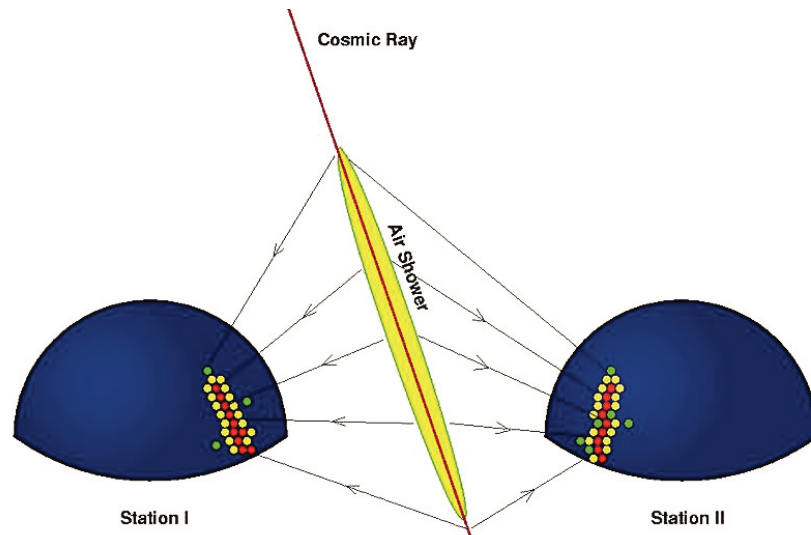


図 1.10: 大気蛍光による空気シャワーのステレオ観測の概念図.

このように，大気蛍光を用いた観測では，シャワーの縦方向発達が推定され，一次エネルギーは不定性の大きい高エネルギーハドロン相互作用の詳細に依存することなく決定される．ただし，この方法でエネルギーを測定するには，大気中の蛍光発光効率，紫外光の散乱・吸収率，鏡の反射率，フィルターの吸収率，光電子増倍管の量子効率などをすべて積み上げて掛け合わせていく必要があり，系統誤差を正しく管理することは容易ではない．

大気中での発光過程と散乱・吸収において考慮する必要がある系統誤差として，チェレンコフ光，レイリー散乱，ミー散乱がある．チェレンコフ光は大気蛍光のバックグラウンド光となり系統誤差の原因となるため，データ解析の際には事象ごとに混入するチェレンコフ光を見積もる必要がある．レイリー散乱は大気分子による散乱で，波長より十分小さな直径の分子による光の散乱である．それに対し，波長に対し無視できない大きさの分子による散乱をミー散乱と呼び，主に大気中のダスト，エアロゾル (霧，もや，塵，煙など) によって起こる．レイリー散乱による大気



の透過率は大気分子の密度から簡単な計算で求められるが、ミー散乱による透過率は大気中のダストやエアロゾル分布の様子に依存するため、大気モニターによる実測から測定する必要がある。

### 地表粒子検出器による観測

多数の粒子検出器を地表に配置して空気シャワー粒子を検出。宇宙線を間接観測する装置は空気シャワーアレイと呼ばれ、高エネルギー宇宙線の観測装置として伝統的に用いられてきた。

空気シャワー粒子は、電磁成分(電子, 陽電子, 光子)とミューオン成分, さらに少量のハドロン成分からなる。これらの検出器として最も一般的に用いられているのが、プラスチックシンチレータなどを用いたシンチレーション検出器である。特にミューオン成分のみを選択的に検出するために、シールドされたシンチレーション検出器や比例計数管でミューオン検出器を構成し、別に配置する場合もある。さらに、空気シャワー軸に近いハドロン成分を観測するために、ハドロンカロリメータを備えている空気シャワーアレイもある。

空気シャワーアレイの場合、一次宇宙線の到来方向は比較的簡単に求められる。空気シャワーは図 1.9 のように粒子群はシャワー面を形成して地表に到来する。この厚みを考慮しつつ各検出器への到来時刻差から空気シャワーの到来方向を求める。一方、一次宇宙線のエネルギーは、各検出器で検出された粒子数から空気シャワー全体の全粒子数と横方向分布を推定することで得られる。しかし、全粒子数と横方向分布から一次宇宙線のエネルギーを推定するためには、ハドロン相互作用を考慮した大規模なモンテカルロ計算を必要とする。その際のハドロン相互作用の不確定性の影響を受けることは避けられない。また、空気シャワー発達のゆらぎの影響も無視できない。

## 1.4 観測結果の現状

1.2 節で述べたように、“2nd knee” 領域の宇宙線は宇宙線起源についての重要な情報を持っていると考えられており、観測結果が注目されている。この“2nd knee” 領域付近の宇宙線を観測する実験として、KASCADE-Grande 実験, Yakutsk 実験, Tunka 実験, IceCube 実験がある。これらの実験結果にはある程度の一致が見られるものの、統一的理解は得られていない。本節ではこれらの実験について簡単に紹介し、観測結果をまとめる。

### KASCADE-Grande 実験

KASCADE-Grande 実験はドイツのカールスルーエ工科大学に展開されていた。KASCADE-Grande 実験は KASCADE アレイの南西側に  $10\text{ m}^2$  のシンチレータ検出器を  $137\text{ m}$  間隔で 37 台配置し、検出面積を  $700\text{ m}\times 700\text{ m}$  に拡張したものである。KASCADE アレイは  $3.2\text{ m}^2$  のシンチレータ検出器 252 台を  $200\text{ m}\times 200\text{ m}$  の範囲に展開した検出器群に加え、 $20\text{ m}\times 16\text{ m}\times 4\text{ m}$  のハドロンカロリメータ 1 台と  $128\text{ m}^2$  のミューオントラッキング検出器 1 台から構成される。KASCADE-Grande 実験はおよそ  $10^{16} \sim 10^{18}\text{ eV}$  のエネルギーを持つ宇宙線を 1996 年から 2009 年にかけて観測していた [15]。

### Yakutsk 実験

Yakutsk 実験はロシアの北東部のヤクーツクに展開されている。58 台の地表シンチレータ検出器 ( $2\text{ m}^2$ ) と地下に配置された 6 台のミューオン検出器 ( $20\text{ m}^2$ ) で  $8.2\text{ km}^2$  をカバーしている。さら

に 48 台のチェレンコフ光検出器で空気シャワーが発するチェレンコフ光を観測する。これによっておよそ  $10^{15} \sim 10^{18}$  eV のエネルギーを持つ宇宙線を観測する [16].

## Tunka 実験

Tunka 実験はロシアの南東部のバイカル湖の近くに展開されている。7 台のチェレンコフ光検出器 (鉛直上方に向けた 8 インチ光電子増倍管 1 本からなる) で構成されるクラスターを 85 m 間隔で 19 クラスター円形に配置し、その中心から周囲半径 1 km の地点にさらに 6 クラスターを配置して、およそ  $3 \text{ km}^2$  をカバーする。これによっておよそ  $10^{15} \sim 10^{18}$  eV のエネルギーを持つ宇宙線を観測している [17].

## IceCube neutronino 観測所

IceCube neutronino 観測所 (以下 IceCube) は南極点のアムゼン・スコット基地の近くに展開されている。検出器は球型のチェレンコフ検出器を 60 個ストリング状に並べたもので、これが 120 m 間隔で 86 本、氷の中、表面から深く 1450~2450 m 範囲に配置され、全体で  $1 \text{ km}^3$  の検出体積を持つ。さらに上記とは別に、地表付近に 2 つのチェレンコフ検出器タンクからなるステーションが 81 ステーション展開されており、IceTop と呼ばれる  $1 \text{ km}^2$  をカバーする地表空気シャワーアレイを構成している。これによっておよそ  $10^{15} \sim 10^{18}$  eV のエネルギーを持つ宇宙線を観測している [18].

### 1.4.1 エネルギースペクトル

図 1.11, 図 1.12, 図 1.13, 図 1.14 に各実験で報告されているエネルギースペクトルを示す。ここで  $\gamma_i$  はスペクトルの冪指数であり、 $\gamma_i$  の値から、異なった観測方法を持つ 4 つの実験で似た構造が見られることがわかる。このことからスペクトルにおける “2nd knee” の存在は実験的に確立したと言って良い。

### 1.4.2 質量組成

図 1.15, 図 1.16, 図 1.17 に Yakutsk 実験, Tunka 実験, IceCube 実験で報告されている質量組成を示す。横軸はエネルギーで、縦軸は原子核の質量数の自然対数を取ったものである。

1.4.1 節で述べたように、スペクトルにおける “2nd knee” の存在は実験的に確立したが、“2nd knee” 付近のエネルギー領域での一次粒子種の観測結果は各実験で異なる。Yakutsk, Tunka は  $10^{16} \sim 10^{17}$  eV のエネルギー領域で、一次エネルギーの増加とともに粒子種が重い原子核へと変化していき、それより上の領域では軽い原子核に変化していく。それに対し IceCube では  $10^{15.5} \sim 10^{17.5}$  eV の全てのエネルギー領域で粒子種が重い原子核へと変化していく。“2nd knee” のエネルギー領域でエネルギーが上がるごとに一次粒子種が重い原子核から軽い原子核に変化していれば、“2nd knee” は銀河系内宇宙線から銀河系外宇宙線へ遷移することによるもので、また、ankle は宇宙背景放射と一次宇宙線との相互作用による電子・陽電子対生成によるものだと考えることができる。“2nd knee” のエネルギー領域より上で一次粒子種が重い原子核のままだと、ankleこそ系内宇宙線から系外宇宙線へ遷移しているところであるかも知れず、“2nd knee” に関しては別の原因を考える必要がある。



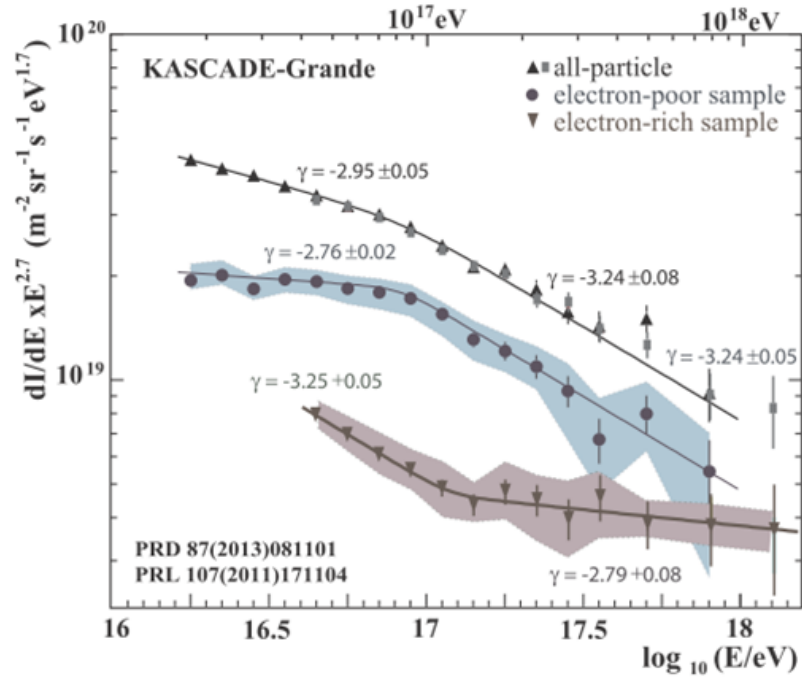


図 1.11: KASCADE-Grande 実験で観測されたエネルギースペクトル [19]. 黒丸と青は muon rich, すなわち重原子核起源のシャワーのエネルギースペクトル. 下三角と茶色は muon poor, すなわち軽原子核のもの. 上三角と四角は全粒子スペクトルで, 灰色四角が 2011 年 [20], 上三角が 2013 年 [21] に発表した結果である. 色付きの領域は系統誤差の範囲を表している.

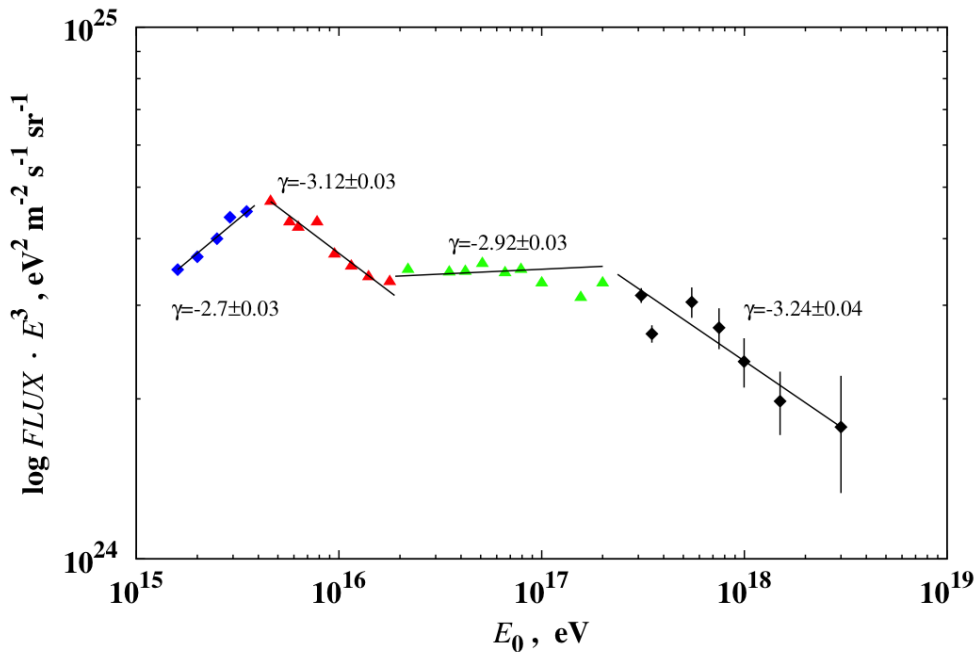


図 1.12: Yakutsk 実験で観測されたエネルギースペクトル [22].

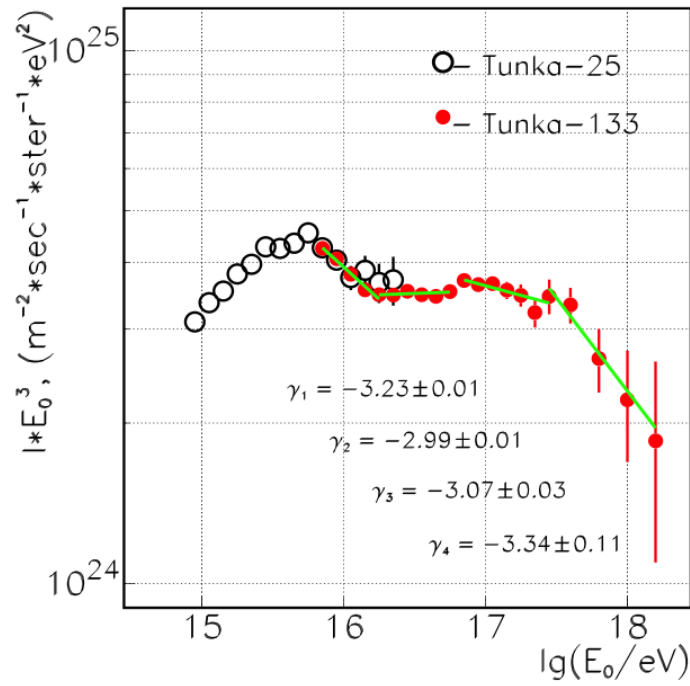


図 1.13: Tunka 実験で観測されたエネルギー Spektral [17].

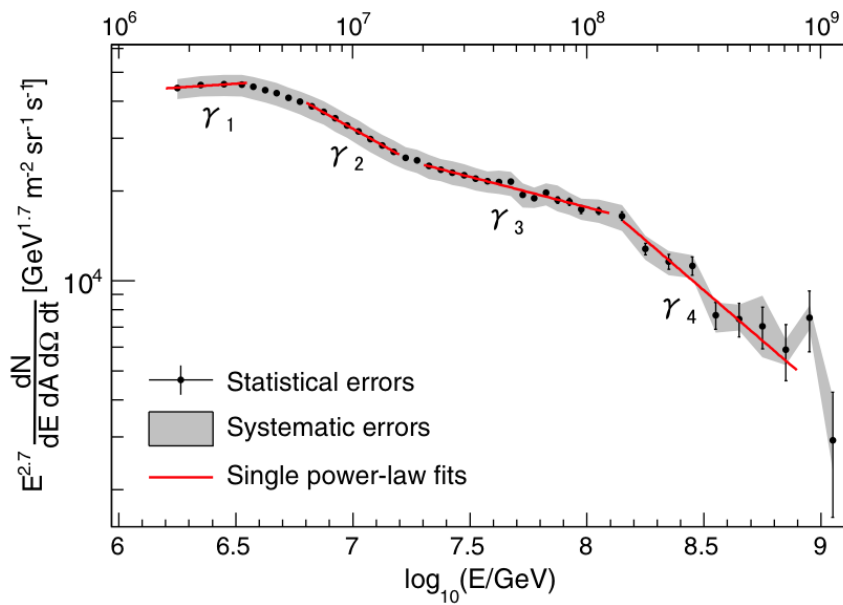


図 1.14: IceTop で観測されたエネルギー Spektral [18].  $\gamma_1=2.63\pm 0.06$ ,  $\gamma_2=3.13\pm 0.03$ ,  $\gamma_3=2.91\pm 0.03$ ,  $\gamma_4=3.37\pm 0.08$ .

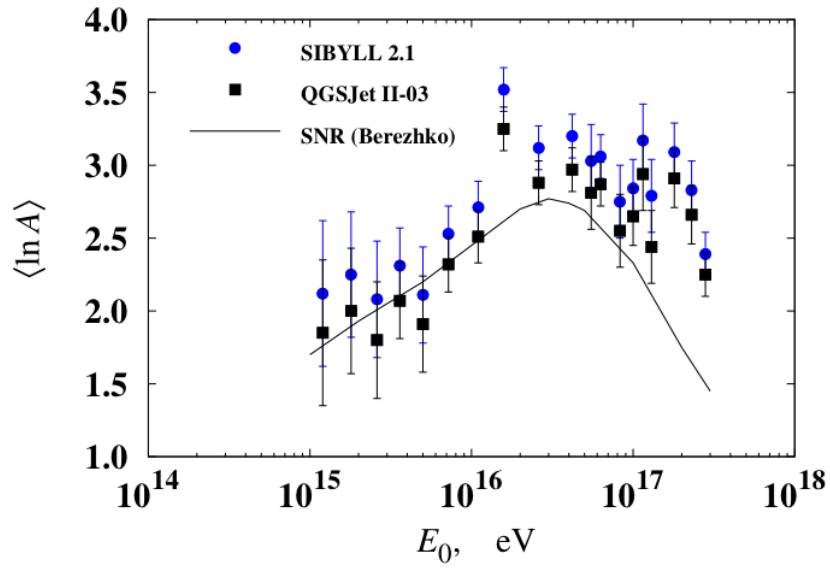


図 1.15: Yakutsk 実験で観測された質量組成 [16].

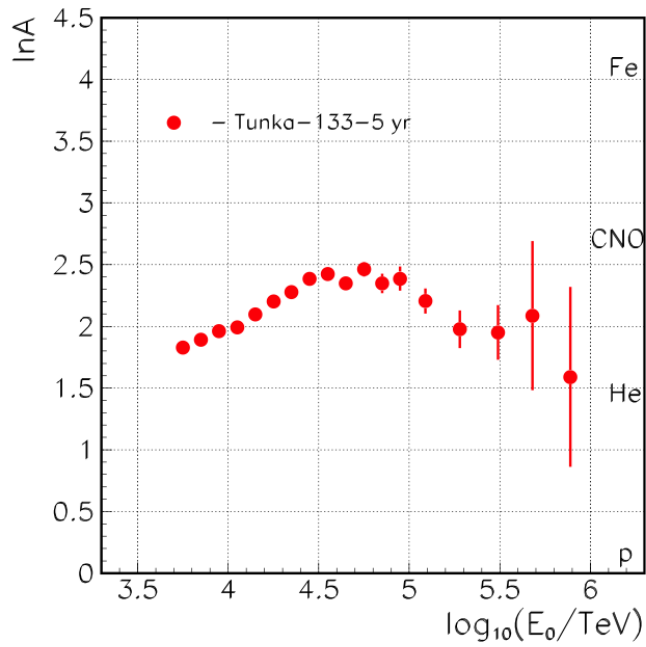


図 1.16: Tunka 実験で観測された質量組成 [17].

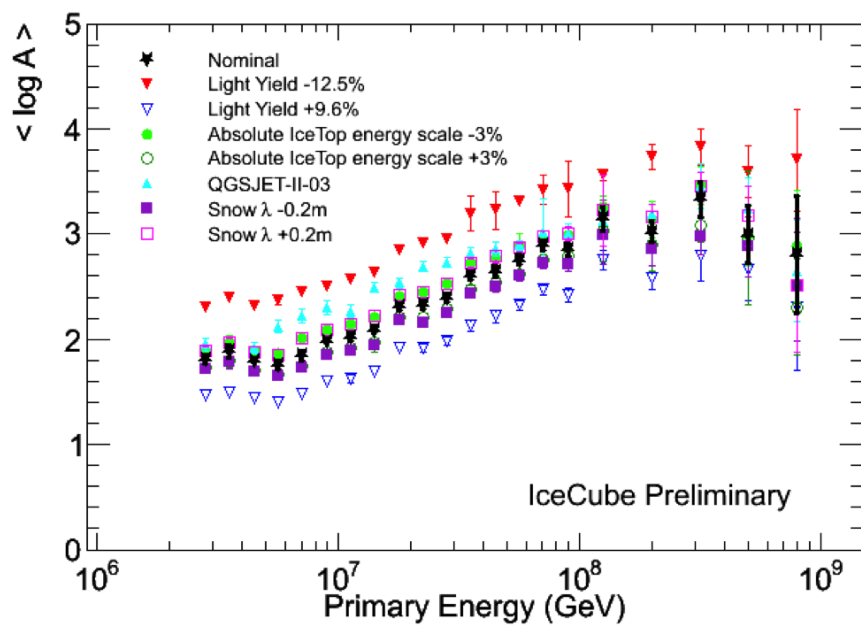


図 1.17: IceCube で観測された質量組成 [18].

## 第2章 TA Low Energy extension (TALE) 実験

宇宙線望遠鏡実験 (TA 実験) は日米韓露ベルギーの国際共同研究で、米国ユタ州に約 700km<sup>2</sup> の地表検出器アレイと 38 台の大気蛍光望遠鏡からなるハイブリッド観測装置を設置し、2008 年から定常観測を継続している。

TA Low Energy extension (TALE) 実験は、TA 実験の拡張実験であり、エネルギー範囲を 10<sup>16.5</sup> eV から 10<sup>20.5</sup> eV までの 4 ケタに拡大し、シャワー再構成分解能に優れたハイブリッド観測で空気シャワーを観測する。このエネルギー範囲は、銀河系内宇宙線とその終わり、系内から系外への遷移、銀河系外宇宙線とその GZK 終端のすべてを含むエネルギー領域である。TALE 実験はこの領域のエネルギースペクトルと質量組成の変化を精度よく測定する。

### 2.1 TALE 実験の目的

#### 2.1.1 銀河系内宇宙線から銀河系外宇宙線への遷移の検出

1.2 節で述べたように、“2nd knee” 領域では銀河系内起源の宇宙線から銀河系外起源の宇宙線へ遷移していると考えられる。この遷移領域では、 $X_{\max}$  分布が鉄成分と陽子成分の両方を含むため、elongation rate(= $X_{\max}$  を  $\log_{10} E$  の関数としてプロットした時の傾き) が小さくなり、 $X_{\max}$  の分布は広くなるはずである。TALE 実験では、ハイブリッド観測という高精度の  $X_{\max}$  測定によって、 $X_{\max}$  の elongation rate と分布幅のエネルギーに依存した変化を見つけ、系内宇宙線から系外宇宙線への遷移の決定的な証拠をつかむ。

#### 2.1.2 宇宙線源の進化の解明

TALE 実験では、ハイブリッド観測による優れたエネルギー分解能と加速器較正による小系統誤差によるエネルギースペクトルの精密測定によって、“2nd knee” ( $z \simeq 1$ ) から GZK cut off ( $z \simeq 0.001$ ) までの宇宙線源の密度の変化を明らかにする。これによって「エネルギースペクトル」「質量組成」「到来方向分布」という観測量に加えて、新しい「進化」という座標軸を切り開く。

### 2.2 TA 実験

TA 実験は、エネルギー決定精度にハドロン相互作用モデル依存性の少ない大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector, FD) と、稼働時間が長く大きな統計量の蓄積が見込める地表検出器 (Surface Detector, SD) による空気シャワーアレイのお互いの利点を生かし、極高エネルギー宇宙線の空気シャワーを観測するものである。

SD アレイの設置, 運用, さらに FD 観測に適した天候、周囲の環境を考慮して, TA 実験の実験場として米国ユタ州ミラード郡の西部砂漠地帯 (平均標高 1400 m, 大気深さ  $860 \text{ g/cm}^2$ ) が選ばれた. この地域は年間降雨量 250 mm, 晴天率 60% と理想的な気候であり, 人工光も極めて少ない.

SD アレイは 1.2 km 間隔で並べられた 507 台のプラスチックシンチレーション検出器からなり, 検出面積は約  $700 \text{ km}^2$  である. FD ステーションはアレイ周辺の三ヶ所に約 35 km 間隔で設置されている. TA の検出器配置を図 2.1 に示す. SD アレイ上空を FD の視野で覆い, 到来する宇宙線を 2 つの検出器でハイブリッド観測することが可能となっている.

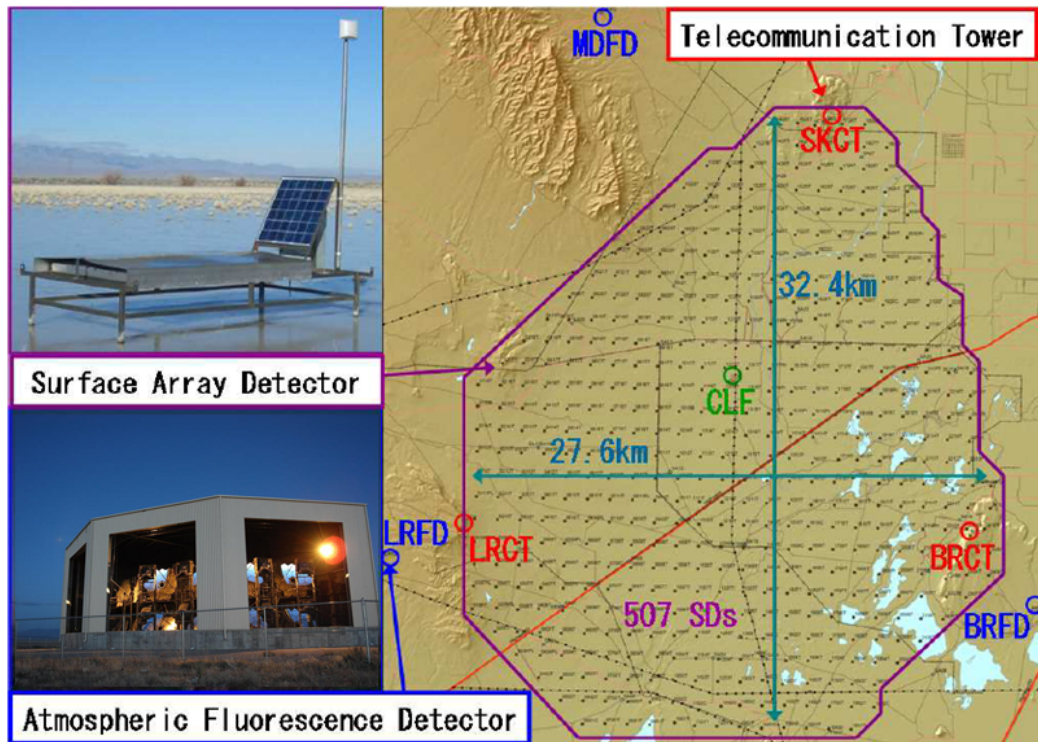


図 2.1: TA 実験における装置の配置図. 黒点が SD の設置場所, 青丸が大気蛍光望遠鏡ステーション, 赤丸が SD のデータ収集に使われる通信塔を表す. 左上は SD, 左下は大気蛍光望遠鏡ステーションの写真.

これまでの観測では, 図 2.2 のように  $10^{18.2} \text{ eV}$  以上のエネルギースペクトル上にいくつかの構造が確認されている.

これらの構造は, CMB と一次宇宙線陽子の衝突によるパイオン生成を起源とする GZK cutoff ( $10^{19.7} \text{ eV}$ ), GZK pileup ( $10^{19.4} \text{ eV}$ ), 電子・陽電子生成による dip ( $10^{18.7} \text{ eV}$ ) が見えていると解釈出来る. 同時に  $X_{\text{max}}$  の測定から, 図 2.3 のようにその平均値と分布はこのエネルギー領域全体で一次宇宙線が純粋に陽子のみからなると仮定した場合と矛盾しないことが分かった. これらの結果を総合して, 最高エネルギー宇宙線は銀河系外起源の陽子であり, CMB 光子との相互作用による強い減衰が起きていると考えられる.

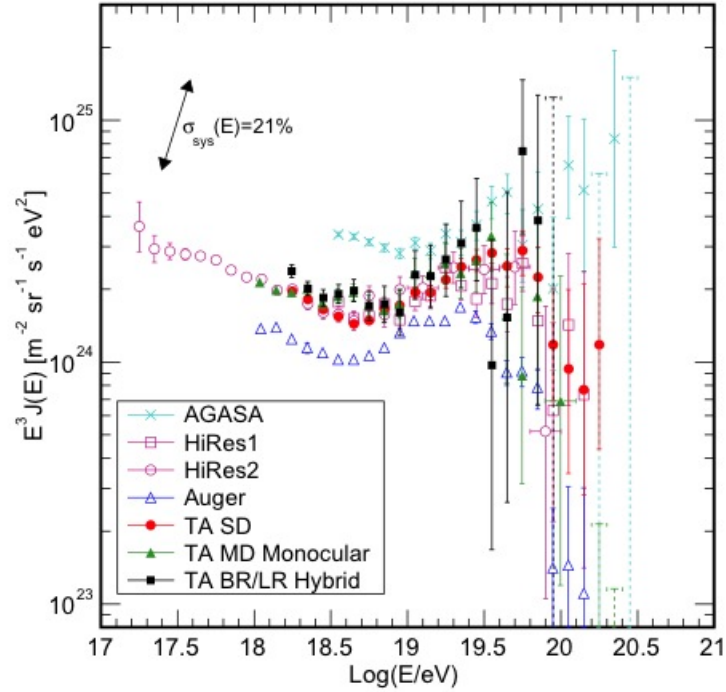


図 2.2: TA 実験といくつかの実験によるエネルギースペクトル [23]. 微細構造を見やすくするためにスペクトルに  $E^3$  を掛けている.

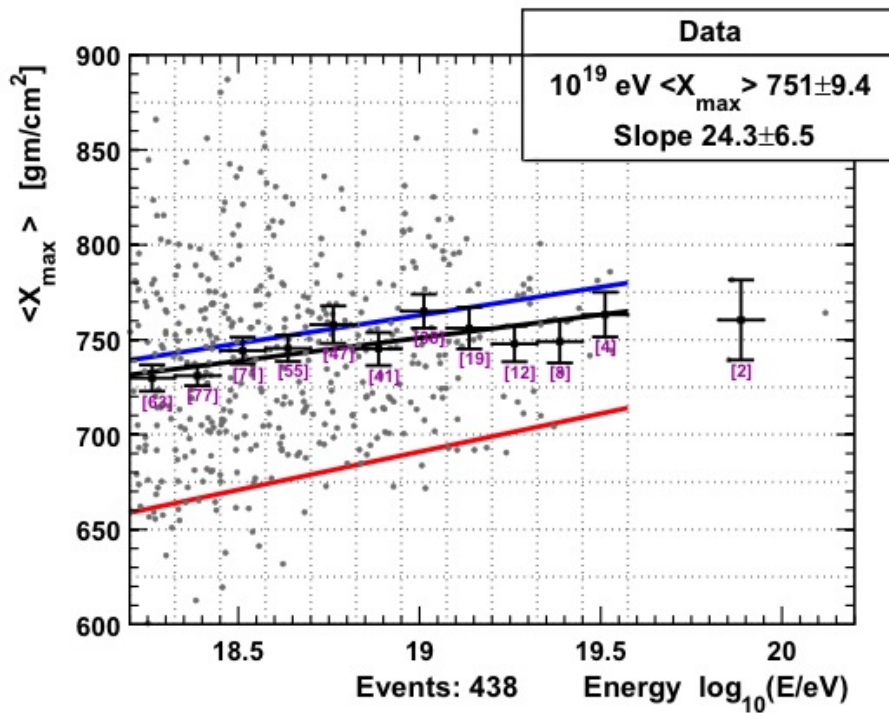


図 2.3: TA 実験による平均  $X_{\text{max}}$  [24].  $10^{18.2} \text{ eV}$  以上のエネルギー領域で 100%陽子である組成と矛盾しない.

### 2.2.1 TA 実験の大気蛍光望遠鏡

TA 実験の大気蛍光望遠鏡は空気シャワーによる大気蛍光を球面鏡で集光し、それを PMT カメラで撮像して観測する装置である。TA 実験では、大気蛍光望遠鏡を 3ヶ所のステーションに集中して設置しているが、それらのうち Middle Drum(MD) ステーションにある 14 台は、HiRes 実験で使用されていた望遠鏡を移設したものである [25]。一方で、Black Rock Mesa(BRM) ステーションと Long Ridge(LR) ステーションには TA 実験のために新たに設計、製作された口径 3m の球面鏡を持つ望遠鏡が各々 12 台ずつ設置されていて、各ステーションは方位角  $108^\circ$ 、仰角  $3^\circ \sim 33^\circ$  の範囲を観測する。地表近くで発生する霧などの影響を避けるために、ステーションは周囲から 100 ~ 200 m 高い所に置かれている。

### 2.2.2 TA 実験の地表検出器

TA 実験の SD アレイは間隔 1.2km の基盤目上にならべられた 507 台の SD からなり、 $700 \text{ km}^2$  の検出面積を持つ。この SD アレイは 3 領域の部分アレイから構成されており、各領域ごとに 1 つの通信塔と無線 LAN 通信を通じて接続されている。各通信塔はそれぞれ Smelter Knoll(SK) 通信塔、Black Rock Mesa(BRM) 通信塔、Long Ridge(LR) 通信塔と呼ばれる。TA 実験と次節で述べる TALE 実験では基本的に同型の SD を用いる (詳細は 2.5 節)。

## 2.3 TALE 実験装置の概観

TALE 実験は、TA 実験に隣接して、TA-FD よりもより高仰角方向を観測する大気蛍光望遠鏡と、より高い設置密度の地表検出器アレイを追加することにより、観測の閾値エネルギーを  $10^{16.5} \text{ eV}$  まで下げ、エネルギースペクトルと質量組成を測定する。その概観を図 2.4 に示す。

TALE 実験の FD ステーションは TA 実験の Middle Drum ステーションに隣接して設置され、TA 実験の望遠鏡よりも上の仰角  $30^\circ \sim 57^\circ$  を観測する。これにより、高い高度で最大発達を迎える空気シャワー、すなわち、より低いエネルギーの宇宙線を観測する。また、TALE-FD ステーションの前には、103 台の地表検出器からなる高密度空気シャワーアレイを展開する。TALE-FD の  $10^{16} \text{ eV}$  台の空気シャワーに対する検出可能範囲はステーションから半径 3 km 以内に限定される。従って、ステーションから 3 km 以内の領域には、低エネルギーの空気シャワーに感度を持たせるため、地表検出器を TA-SD よりも密に配置する。そこで、TALE 望遠鏡ステーションに最も近い部分には 400 m 間隔で地表検出器を 40 台並べ、 $3 \times 10^{16} \text{ eV}$  以上の空気シャワーに対して 100 % のハイブリッド検出効率を持つようにした。そしてその外側の部分、ステーションから 3~5 km の範囲では 600 m 間隔で地表検出器を 36 台並べ、 $10^{17} \text{ eV}$  以上の宇宙線に対して 100 % の検出効率を持たせる。さらに、このような高密度配置部分と TA-SD のアレイを接続するために、間を埋めるように 27 台の検出器を 1.2 km 間隔で配置する。

## 2.4 大気蛍光望遠鏡

TALE-FD ステーションは TA 実験の MD ステーションに隣接して設置されている (図 2.5)。TALE-FD ステーションに設置される望遠鏡とエレクトロニクスは HiRes-II 実験で使われた装置を再調整して使われる。望遠鏡の主鏡は合成球面鏡であり、望遠鏡 1 台の視野は方位角方向、仰角方向ともに  $14^\circ$  である。TALE-FD ステーションは  $30^\circ \sim 44^\circ$  の視野を向く望遠鏡 5 台と、 $44^\circ \sim 57^\circ$  の視野を向く望遠鏡 5 台からなり、全体では方位角方向に  $114^\circ$ 、仰角方向に  $30^\circ \sim 57^\circ$  がカバーさ



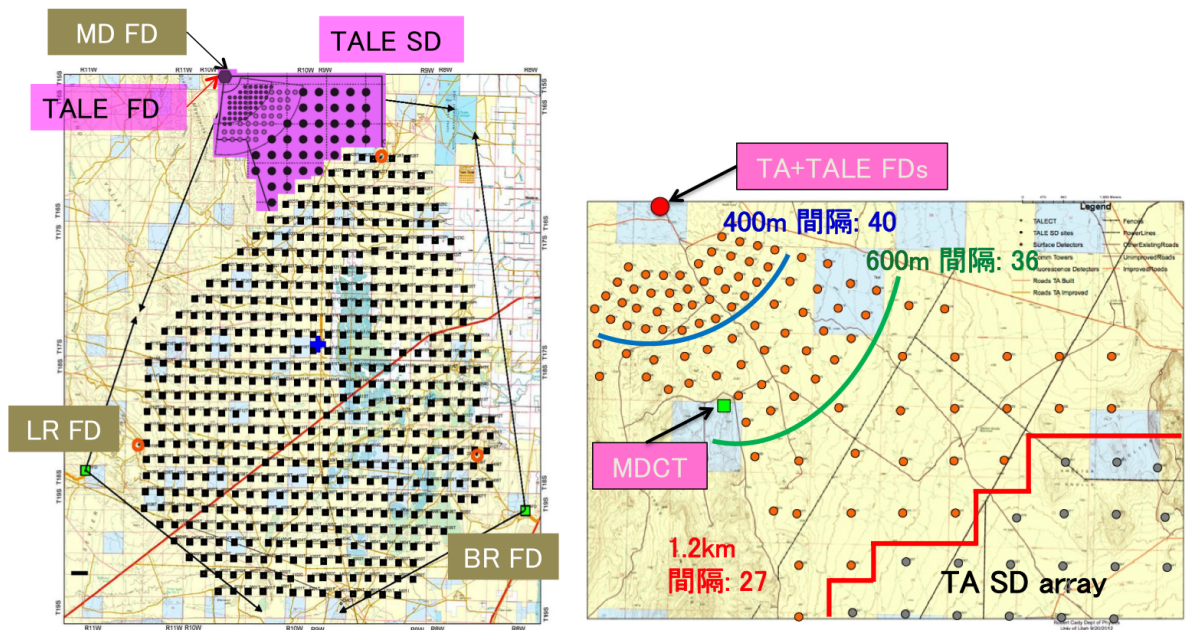


図 2.4: (左)TA 実験, TALE 実験の配置図. TALE 実験は TA 北端の紫色の領域に設置されている. (右)TALE 実験の配置拡大図. 橙色の丸の地点に TALE-SD を設置する.



図 2.5: 左が MD ステーションで, 右が TALE-FD ステーション.

れる(図 2.6)。図 2.7 に TALE-FD を示す。望遠鏡に使われる球面積は、MD ステーションで使用されているものと同様の、半径 630 mm の円形のセグメントミラー 4 枚からなる面積  $4.18 \text{ m}^2$  のクローバー型の合成球面鏡である。

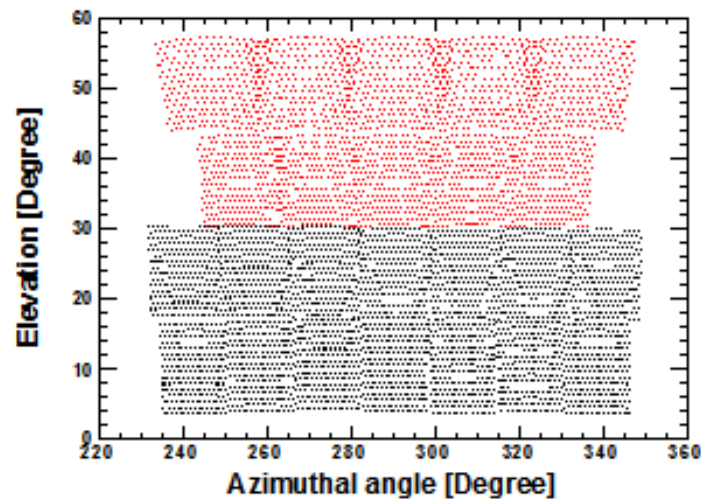


図 2.6: 上の赤い部分が TALE ステーションの視野、下の黒い部分が MD ステーションの視野。MD-FD では仰角  $3^\circ \sim 31^\circ$  で観測しているが、TALE-FD ではさらに上の仰角  $30^\circ \sim 57^\circ$  を見る。

## 2.5 地表検出器

### 2.5.1 地表検出器の基本構成

TALE 実験では、TA 実験で使用している SD と同型のものを使用する(図 2.8)。ただし、TA 実験で使用している無線 LAN モジュールはすでに生産が終了し入手できないため、TALE-SD では無線 LAN モジュールを交換した。それに伴いファームウェアの最適化を行った。この部分の詳しい説明については 3 章で後述する。

SD には、1.2 cm 厚、2.0 m $\times$ 1.5 m のプラスチックシンチレータ (CI 工業社製 CIMS-G2) によって 2 層構造を持たせたものが用いられている。図 2.9 に、SD シンチレータの構成図を示す。上下 2 層のシンチレータにはそれぞれ、2 cm 間隔で直径 1 mm の溝が掘られており、その溝に各層 104 本の波長変換ファイバー (Kuraray 社製 Y-11) が埋め込まれている。このファイバーにより各層のシンチレータで発光した光はそれぞれ上層用、下層用の光電子増倍管 (Electron-tubes 社製 9124SA 以下 PMT) に集められる。そして、PMT からの出力は 12 bit、50 MHz のサンプリングの FADC(AD9235BRU-65) によりチャンネル毎にデジタル化し、記録され、無線通信でタワーに送られる。SD の動作タイミングは、各 SD に搭載された GPS 受信機 (Motorola M12+) によって、GPS の 1PSS に同期されており、異なる SD 間でのタイミングのずれは約 14 ns 以内である。

電力源としては 120 W の太陽パネル (京セラ社製 KC120J) と蓄電池 (DYNASTY 社製 DCS-100L) を用いており、現地の日照、気温などの環境下では外部からの電源供給なしに 365 日 24 時間、自立稼働することができる。



図 2.7: TALE ステーションの大気蛍光望遠鏡.



図 2.8: 現地に設置された TALE-SD. 左奥に MD/TALE-FD ステーションが見える.



図 2.10 にソーラーパネルの裏側を示す。ここにはバッテリー、クーラーボックス、エレクトロニクスが置かれ、これらは砂や雨の侵入を防ぐためステンレスボックスに収納されている。バッテリーは温度に依存して充放電性能が変化するので、クーラーボックス内に収納し温度変化を抑えている。また、バッテリー側面にはフィルムヒーターを貼付してあり、必要に応じてバッテリーを温める。

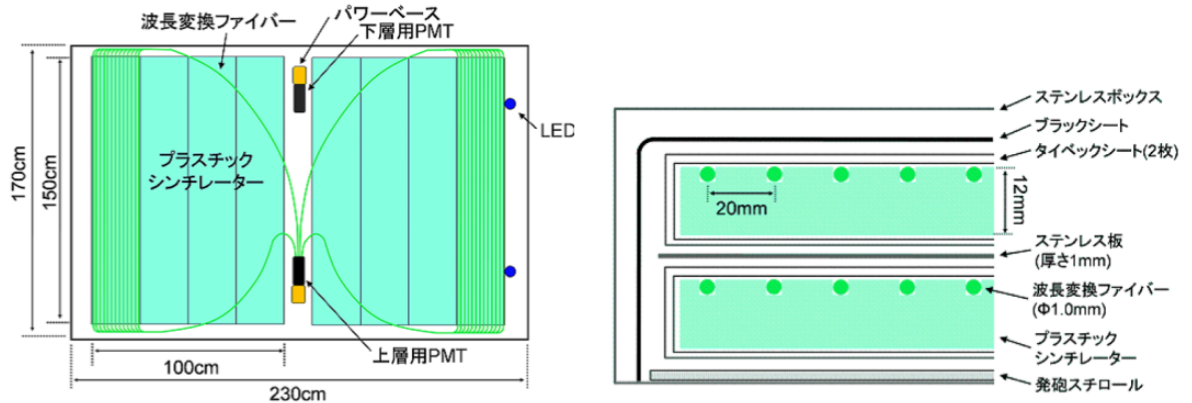


図 2.9: (左) シンチレータボックスの内部構造. (右) シンチレータボックスの断面図.



図 2.10: ソーラーパネルの下に箱にエレクトロニクスとバッテリーが収納されている。

図 2.11 に SD のエレクトロニクスの外観写真とブロック図を示す。SD のエレクトロニクスは FADC, PMT, 無線 LAN モジュール, GPS の他に主なものとして FPGA(Xilinx 社製 XC3S1000), CPLD(Xilinx 社製 XC2C256), CPU(ルネサステクノロジ社製 SH4 マイコン SH7750S) で構成されている。FPGA は高速信号処理に用いられ、ゲート数は 100 万である。主に PMT 波形信号の処理と保存, PMT 印加電圧のコントロール, シリアルインターフェースのコントロールに用いられる。CPLD は主に CPU のブートコントロール, FPGA のブートコントロール, 電源コントロールに用いられ、CPU では大半の情報処理が行われる。CPU の動作周波数は 167 MHz である。

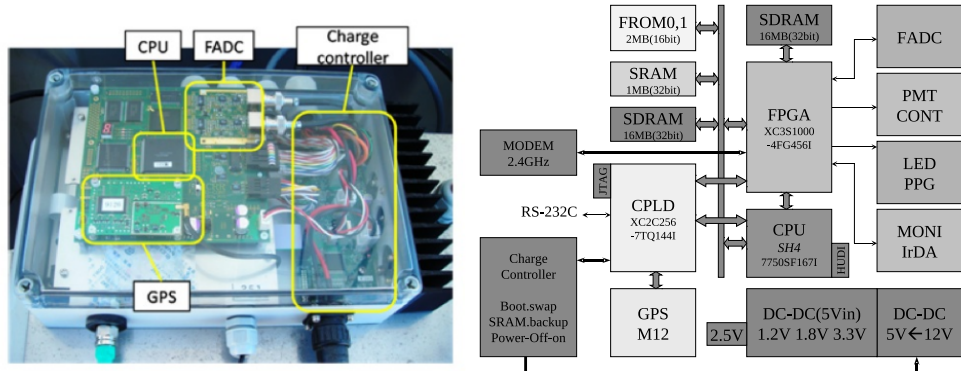


図 2.11: (左)TALE 実験で使用するものと同型の TA 実験 SD 用エレクトロニクス. 各 SD とタワーに設置されている. (右)SD 用エレクトロニクスのブロック図.

### 2.5.2 タワーの基本構成

図 2.12 にタワーの外観を示す. タワーは, 主に SD と通信するための無指向性アンテナと, 電子機器, トリガー用電子機器, DAQ 用の産業用 PC, タワー同士が通信するための指向性アンテナと電子機器 (Motorola 社製 Canopy PTP100), 発電用太陽パネルと蓄電池からなる.



図 2.12: TALE 実験用の無線 LAN タワー. 太陽パネルにより電源供給している. 写真の右奥には MD/TALE-FD ステーションが小さく写っている.

### 2.5.3 データ収集サイクル

TALE 実験では, タワーエレクトロニクスと各 SD が無線通信を行うことでデータ収集している. この節ではデータ収集の流れとデータ収集に用いられる 3 種類のトリガーについて示す.

## レベル0トリガー

物質中の荷電粒子の単位長さあたりのエネルギー損失量には下限が存在し、エネルギー損失量が最小になるエネルギーを持つような粒子を得に最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle:MIP) と呼ぶ。シンチレータ中での粒子のエネルギー損失が最小となるエネルギーは粒子によって異なるが、地表に到来する宇宙線は主にミューオンであり、様々なエネルギーを持つが、これらを平均した形での1MIPを測定することでSDを較正する。また、各検出器の1MIPに対する応答を常にモニターし求めることで、全SDの応答を規格化しそろえることができる。

空気シャワーに含まれる荷電粒子の大半は放射性物質起源の放射線に比べ非常にエネルギーが大きいので、上下層のシンチレータを貫通する。従って、シャワー粒子に対するトリガーは上下層のコインシデンスでかければ良い。この空気シャワー粒子の入射を判定するトリガーがレベル0トリガーである。レベル0トリガーのための波形積分時間は8タイムスライス(=160ns)であり、スレッシュホールドは0.3MIPに相当する15ADCカウントである。レベル0トリガー条件を満たした波形の記録長は2.56 $\mu$ sで、継続時間の長い信号は連続した複数の波形として保存される。これは無線通信を用いたデータ転送の際の packetsize を大きくしすぎないためである。

以下に、データバッファリングの手順について示す。なお、以下の手順はすべてFPGAに実装された論理回路によって行われている。

1. 8タイムスライス分(幅160ns)のFADC積算値の計算を、8タイムスライス(幅160ns)ずつ移動させながら行い、GPSの1PPS信号からの1秒間におけるFADC積算値の最頻値を計算する。この値を次の1秒間のペDESTALレベルとする。
2. 8タイムスライス分(幅160ns)のFADC積算値を計算し、1タイムスライス(幅20ns)ずつ移動させながらこの計算を繰り返す。計算した値からペDESTALレベルを差し引いた値が上下層共にスレッシュホールド(0.3MIP相当)を越えていれば、レベル0トリガーを発行する。このトリガーから1280ns以内に起こった次のレベル0トリガーは無効化される。
3. レベル0トリガーが発行されると、その波形を波形記録専用のSDRAMに転送する。波形はトリガーの640ns以前から1920ns以後まで保存される。トリガーの1280ns以後から2560ns以後の間に二つ目のトリガーがかかった場合、波形の重複を防ぐため二つ目のトリガータイミングは、一つ目のトリガータイミングの2560ns後まで遅らされる。波形記録専用のSDRAMへの転送と同時に、波形の積分値、波形の最大値、1PPS間のクロック数、波形番号を保存する。これらの情報は10msごとにCPUと共有のSDRAMにDMA転送される。また、これらの情報のリストをレベル0トリガータブルと呼ぶ。

## レベル1トリガー

レベル1トリガーのスレッシュホールドは150カウント(=3MIP)、積分ゲート幅は波形の記録幅と同じ128タイムスライス(=2560ns)である。レベル0トリガータブルを元にして、タワーエレクトロニクスに送信するレベル1トリガータブルを作る手順について示す。なお、以下の手順はすべて各検出器のCPUで行われる。

1. GPSの1PPSと同時にCPUに割り込みがかかり、割り込み処理と同時にレベル0トリガータブルをFPGAから読み込む。

2. DMA 転送中であればそれが終了するまで待った後、レベル0トリガーの処理を開始する。処理の内訳は、クロック数から  $\mu\text{s}$  への変換、DMA 転送が正しく行われたかどうかの確認、モニターデータの生成である。クロック数をそのまま使うのではなく  $\mu\text{s}$  とする理由は、データサイズを小さくするためとクロック周波数が少しずつ異なる SD 同士で同期をとるためである。同時に、波形の積分値からペDESTALレベルを差し引いた値がスレッシュホールドの150カウントよりも大きければレベル1トリガーを発行する。
3. レベル1トリガーがあると、 $\mu\text{s}(20\text{ bit})$  と波形の積分値の上下層の平均(4 bit)を組み合わせ、3 byte のデータとして記録する。このリストをレベル1トリガータブルと呼ぶ。

## レベル2トリガー

タワーエレクトロニクスは各 SD からレベル1トリガータブルを収集し、レベル1トリガーが  $8\mu\text{s}$  のコインシデンス時間内で3台以上隣接する SD が見つかったら、レベル2トリガーを発行する。レベル2トリガーがあるとその時刻(レベル2トリガーの判定に使用されたSDの内、最も早くレベル0トリガーを発行したSDのトリガー時刻)はDAQリストに登録される。即座にトリガーを各SDに配信しない理由は通信オーバーヘッドを減らすためである。

以下に、レベル2トリガー判定の手順を示す。

1. レベル1トリガータブルをSDから取得する。
2. GPSの1PPSと同時にCPUに割り込みがかかり、レベル1トリガータブルの  $\mu\text{s}(20\text{ bit})$  とSD座標番号(12 bit)を組み合わせ、さらに時刻順に並び替えてアレイ全体のトリガータブルを生成する。1PPSと同期させて処理を行う理由は、SDのトリガーサイクルと同期させることで無駄な待ち時間を発生させないためである。
3. このトリガータブルを  $8\mu\text{s}$  のゲート幅で走査し、レベル1トリガーが3つ以上ある場合は隣接条件を満たすかどうかの確認を行う。3台以上の隣接SDでレベル1トリガーがかかっていたらレベル2トリガーを発行し、DAQリストへ登録する。

レベル2トリガーが発行されると、タワーエレクトロニクスはレベル2トリガー時刻から  $\pm 64\mu\text{s}$  の範囲の波形をSDから収集する。波形は128サンプル $\times$ 12bitで記録されているので上下のチャンネルを合わせて1波形あたり合計384Byteである。

これら3種類のトリガーを用いたデータ収集サイクルを時系列にそって書き下すと、以下のようになる。

1. SDは、PMTの波形信号処理をし、トリガーの判定を行い、レベル0テーブルを生成する。さらにレベル1トリガーがあるとレベル1トリガータブルを生成する。
2. レベル1トリガーが発行されるとタワーエレクトロニクスの要求に従ってSDはレベル1トリガータブルをタワーに送出する。レベル1トリガーを受けたタワーエレクトロニクスはレベル2トリガーの判定を行う。
3. レベル2トリガーが発行されると、タワーエレクトロニクスはSDへトリガーを送信する。SDはタワーエレクトロニクスからのレベル2トリガーを受けると、トリガーに対応する波形を探索する。

4. SD は探索結果をタワーエレクトロニクスへ送信する。探索結果を受けたタワーエレクトロニクスは SD に波形送信命令を出し、SD は波形をタワーエレクトロニクスに対して送出する。
5. ただし、波形送信が1秒で終わらなかった場合は、SD はタワーエレクトロニクスに向かって波形送信が終わるまで1秒毎に波形残り部分を送信し続ける。この送信はトリガー情報転送が終わった後の空き時間で行う。

ここでは、1つの箇条書きの各項目が1秒に行われる処理である。また、オーバーヘッドを減らすために、異なる情報の送受信をまとめて同時に行う。

#### 2.5.4 モニター情報とモニタリングシステム

レベル1トリガーテーブルの転送の際、各SDはヘッダー情報と共に自らの動作状況・状態を表すモニター情報を分割して送信している。モニター情報は9kByte程度であり、トリガーDAQに負荷をかけないように600分割して毎秒16Byteずつ送信される。そして、毎秒取得される情報が8Byte、1つのレベル1トリガー情報は3Byteなので、レベル1トリガー数を $N$ とすると、1台のSDは1秒毎にヘッダー情報の他に合計 $(24+3N)$ Byteをタワーに向かって送信している。

以下に、モニター情報の詳細を示す。モニター情報には収集時間間隔が、1秒のもの、1分のもの、10分のものがある。ただし、収集時間間隔が1秒の情報は毎秒取得されるため、送信時に分割されない。つまり、上記の9kByteには含まれていない。

- 毎秒取得される情報
  - 1PPS間のクロック数(4 Byte)。GPS及びクロックの安定性の確認に用いる。
  - GPSタイムスタンプ(2 Byte)。1PPSが継続して出力されつづけているか、つまりSD間で同期がとれているかどうか確認するために用いる。
  - レベル1トリガーの数(2 Byte)。ホットチャンネル、デッドチャンネルの識別に用いる。
- 収集時間間隔1分の情報
  - レベル0トリガー数。トリガーサイクルの安定性、ゲインが適切に設定されているかの確認に用いる。
  - バッテリー電圧。解析には用いられないが、SDの安定稼働のために重要な項目である。
  - 充電電流。太陽電池による充電が正常かを確認する。
  - 太陽電池の出力電圧。
  - 温湿度。
- 収集時間間隔10分の情報
  - バックグラウンドミューオン信号のスペクトル。SDのゲイン較正に用いられる。約50ADCカウントが最頻となるようにゲインが調整されている。
  - ペDESTALのヒストグラム。SDの較正に用いられる。
  - PMT出力信号のピーク波高のヒストグラム。
  - GPSの状態を表すフラグ。
  - 通信できているGPS衛星数。

これらのモニター情報を確認し、不具合が生じていればメンテナンスする。モニター用アプリケーションの出力グラフの一部を図2.13に示す。



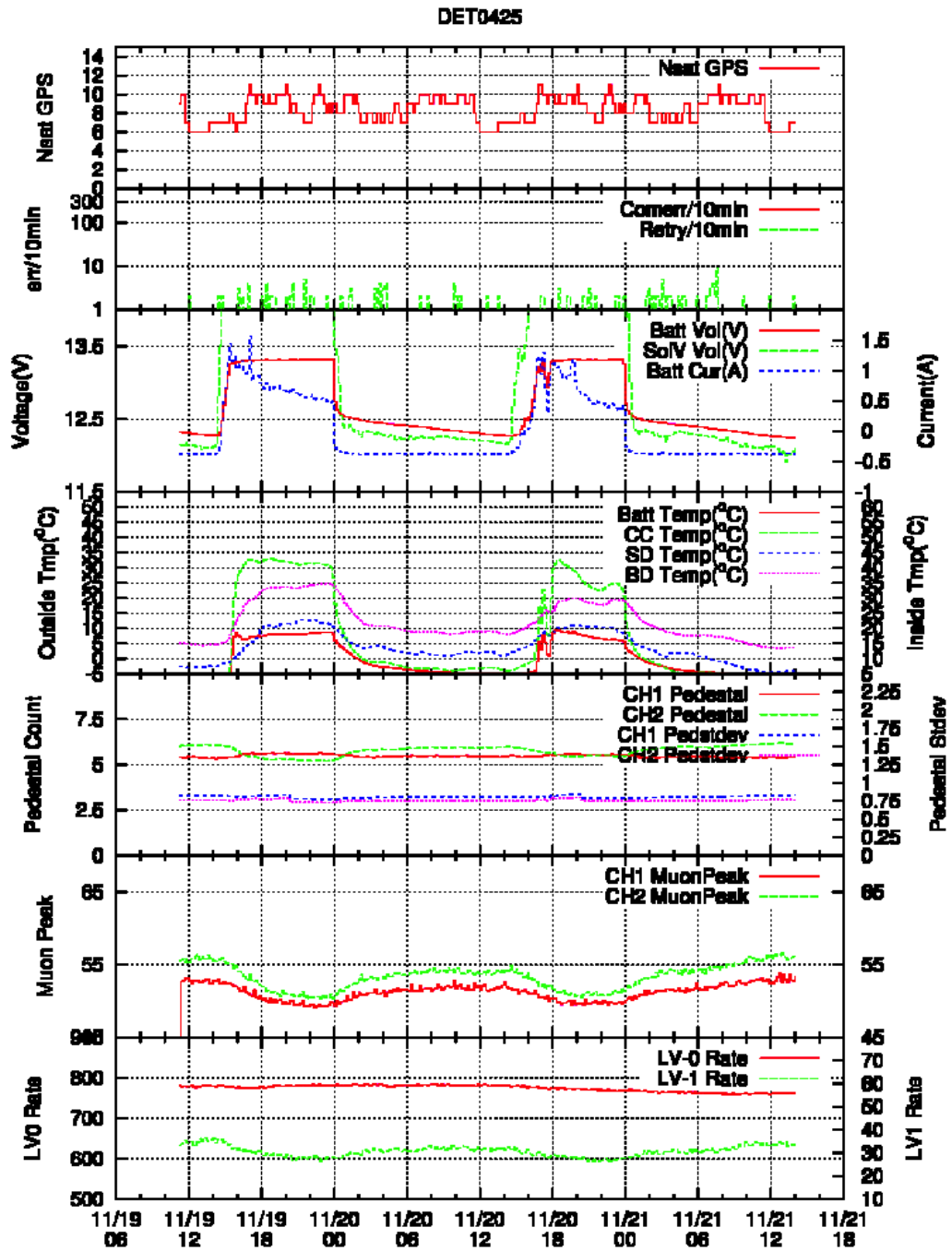


図 2.13: TALE 実験の SD のモニター例. 上から, 通信できている GPS 衛星数, 通信状態, バッテリー電圧, 気温, ペDESTAL, ミューオンピーク, トリガーレートを表す.

## ペDESTALのヒストグラム

ペDESTALレベルを得るため、FPGA 内部では8タイムスライスごとにFADCカウンットの8タイムスライス分の積分値を求め、それらを1秒分ためてヒストグラムとしている。CPUはこのヒストグラムを1秒ごとに読み取り、さらに10分間積算する。これが「ペDESTALのヒストグラム」と呼ばれるモニター情報で、10分ごとにタワーへ転送される。分解能は1カウント、レンジは0から256カウントまでである。

## バックグラウンドミューオン信号のスペクトル

レベル0トリガーごとにFPGA 内部では波形の積分値を求め、それらを1秒分ためてヒストグラムとしている。積分ゲート幅は240 ns、波高の最大値の前80 ns、後160 nsである。CPUはこのヒストグラムを1秒ごとに読み取り、10分間積算する。レベル0トリガーを満たす信号の大半は、シャワーと無関係なバックグラウンドミューオンによるものと考えられるので、これが、「バックグラウンドミューオン信号のヒストグラム」と呼ばれ、10分ごとにタワーに送られる。これは、バックグラウンドミューオンのヒストグラムがモニター情報として取得されるのが10分ごとであるためである。分解能は1カウント、レンジは0から512カウントまでである。

## 第3章 TALE実験用SDのためのエレクトロニクス

2.5.1節でも述べたように、TALE 実験では TA 実験で使用している SD と同型ものを使用する。ただし、TA 実験で使用している無線 LAN モジュールはすでに生産が終了しているため、TALE 実験では新しい無線 LAN モジュールを使用する。図 3.1 に SD エレクトロニクスの概略図を示す。無線 LAN モジュールによってデータを送受信する際は、CPU と FPGA でデータを処理する。そのため無線 LAN モジュールの交換に伴い、CPU と FPGA のファームウェアを新たに開発した。この章では CPU と FPGA のファームウェア及び TALE 実験で使用する新規無線 LAN モジュールについて、そして新規無線 LAN モジュールを使用することで新たに必要となったアクセスポイントについて解説する。

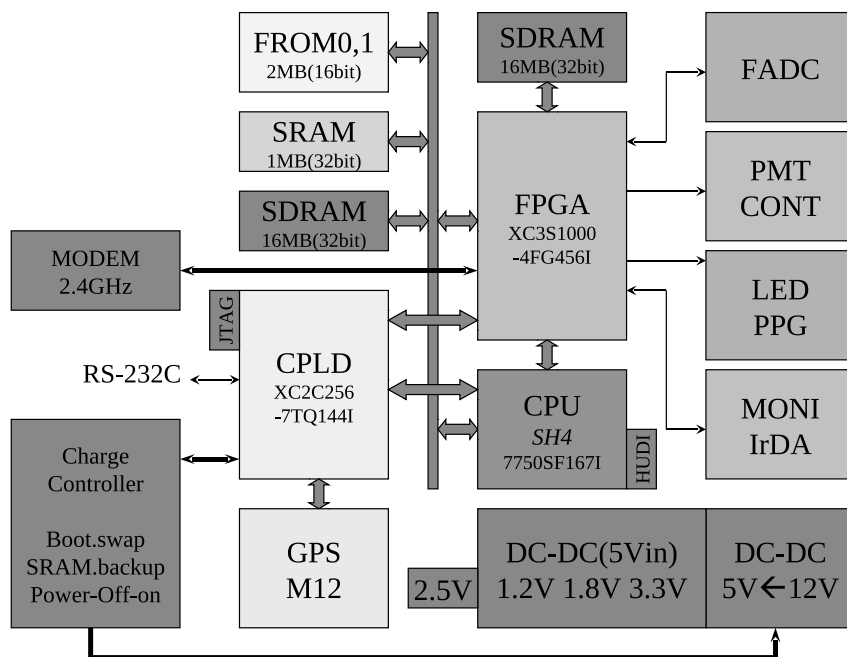


図 3.1: SD エレキのエレクトロニクスの概略図.

### 3.1 CPU

図 3.2 に SD エレクトロニクスに搭載されている CPU であるルネサステクノロジ社製 SH4 マイコン SH7750S を示す。動作周波数は 167MHz であり、CPU のファームウェアはリンカスクリプト言語、アセンブラ言語、C 言語で記述されている。CPU には動作を軽くするために OS を搭載していない。そのため、オブジェクトコードに具体的なアドレスを割り当てる際、実際に存在

するメモリの情報とどこに何を配置するのかをリンクスクリプトを用いて割り当てる。このリンクスクリプトによってメモリの先頭アドレスに書き込まれているのがアセンブラ部である。つまり、エレクトロニクスの電源が入り、CPUに電源が供給されると、最初にアセンブラ部が実行される。アセンブラ部が実行された後、メインルーチンであるメインプログラムが実行される。以下アセンブラ部とメインプログラムについて解説する。



図 3.2: TALE 実験用 SD で使用する CPU(TA 実験と同様)。ルネサステクノロジ社製 SH4 マイコン SH7750S.

### 3.1.1 アセンブラ部

start.asm は、CPU のハードウェアに密接した動作がアセンブリ言語で記述されており、大きくブートコード部分と割り込み処理ハンドラ部分に分けることができる。

#### ブートコード部分

CPU のリセットには、パワーオンリセットとマニュアルリセットの 2 種類のリセットがある。パワーオンリセットは完全なリセットであり、それに対しマニュアルリセットは、ソフトウェアリセット的な意味合いが強く、CPU 内蔵レジスタのほとんどはリセットされない。

CPU ではこれらのリセットが発生すると H'A000\_0000 番地からコードを実行する。H'A000\_0000 番地は P2 領域という、キャッシュ不可・アドレス変更不可の領域に割り当てられる。この領域へアクセスすると、32bit のアドレスバスの上位 3bit を 0 にしたアドレスで外部バスにアクセスする。すなわち、H'0000\_0000 番地がアクセスされる。

このエレクトロニクスでは、アドレス H'0000\_0000 にはフラッシュROM に外部メモリ空間を割り当てているので、リセットが発生するとフラッシュROM からプログラムを実行する。

その後、メモリマップの設定、SDRAM の動作モード設定、キャッシュの設定など CPU の内蔵レジスタの設定を行う。これらの内蔵レジスタの設定を行った後、main.c 内の main() 関数に飛ぶ。

## 割り込み処理ハンドラ部分

割り込み処理ルーチンはブート時には呼び出されないが、システムの通常動作時において頻繁に呼び出されるルーチンである。このルーチンは、割り込みが発生した際にその発生要因を調べ、発生要因に対応した処理ルーチンをコールするという動作を行う。

### 3.1.2 メインプログラム

メインプログラムは main() 関数を記述するためのファイルであり、C 言語で記述されている。図 3.3 に main() 関数の概略を示す。

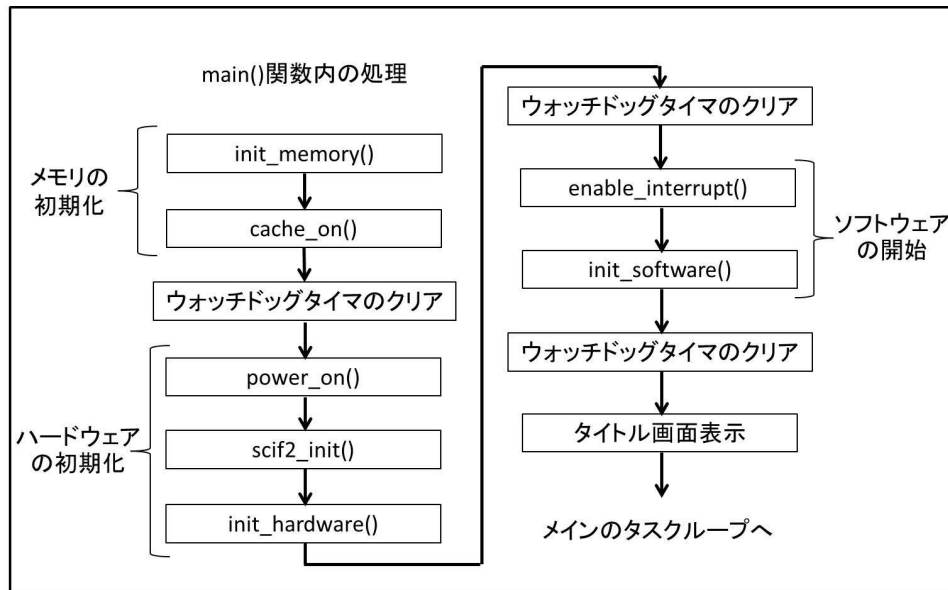


図 3.3: main() 関数における処理の流れ。

main() 関数が呼び出されると、最初にメモリの初期化を行う。そして、FPGA を含む各種ハードウェアを初期化し、割り込みを許可した後、ソフトウェアを初期化し、メインのタスクループへと移行する。この間約 1 秒おきにウォッチドッグタイマのクリアを行っており、システム初期化の最中にも度々呼び出している。特に、FPGA のコンフィギュレーションなどの長い時間を要する処理は、前後にウォッチドッグタイマのクリアを行う必要がある。

メインのタスクループには 2.5.3 節で述べたトリガー DAQ 処理以外に、シリアル送受信時の処理と、SD 側のファームウェアにはタワーからの受信をチェックする部分が記述されている。

## シリアル送受信時の処理

PC からシリアル通信で受信したコマンドを処理する。コマンドテーブルがまとめられているファイルがあり、受信したコマンドと一致するコマンドをコマンドテーブルから探し、実行する。

## タワーエレクトロニクスからの受信チェック

SD 側のファームウェアには、タワーエレクトロニクスから送信されてくる信号をチェックする関数が実装されている。SD は自発的にタワーエレクトロニクスにデータを送信することではなく、タワーエレクトロニクスから送られてくる信号をチェックし、その中にあるタワーエレクトロニクスからの命令を見て、返信が必要な命令であれば返信する、という通信の流れになっている。タワーエレクトロニクスから信号を受信し、信号内にある要求されたコマンドを別の実行関数に引数として与えることで、命令を実行する。このタワーエレクトロニクスから要求されるコマンドもコマンドテーブルとしてまとめられている。

## 3.2 FPGA



図 3.4: エレクトロニクスで使用されている FPGA, Xilinx 社製 XC3S1000.

エレクトロニクスで使用されている Xilinx 社製 FPGA の XC3S1000 を図 3.4 に示す。ゲート数は約 100 万である。FPGA の動作プログラムは VHDL で記述されており、図 3.5 のような階層構造をしている。

ここで、無線 LAN モジュールを交換するために書き換えが必要であったコンポーネントは、無線 LAN モジュールとの通信を記述している `u0_wmodem` 以下のコンポーネントである。`u0_wmodem` 内を簡略化したものを図 3.6 に示す。

`u0_wmodem` は無線通信コンポーネント (`u_wm_if`)、送信データ用バッファ (`u_wm_send_buf`)、受信データ用バッファ (`u_wm_recv_buf`) の 3 つのコンポーネントからなっている。無線通信コンポーネントで無線 LAN 送受信に伴う処理のほとんどを担っている。以下では、`u0_wmodem` 内をコンポーネントごとに詳しく解説する。

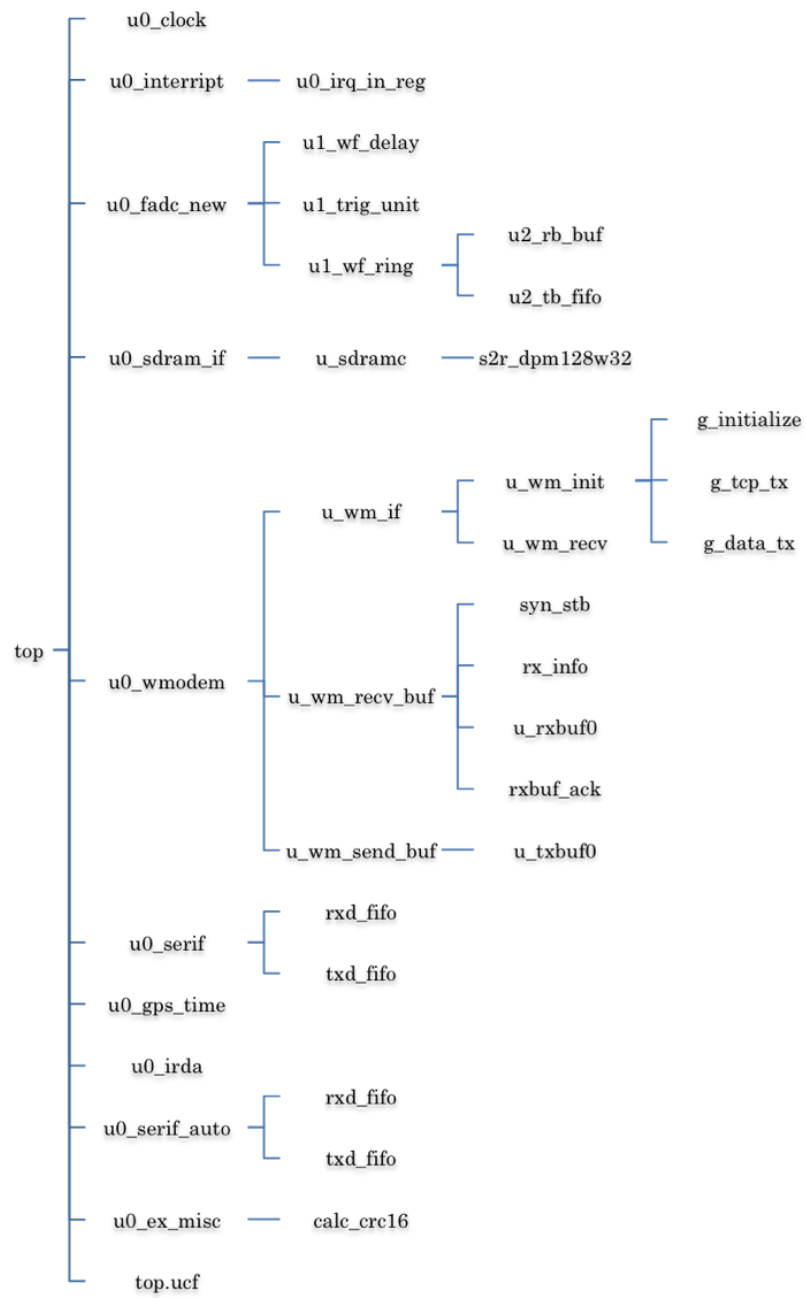


図 3.5: FPGA 内部の階層構造.



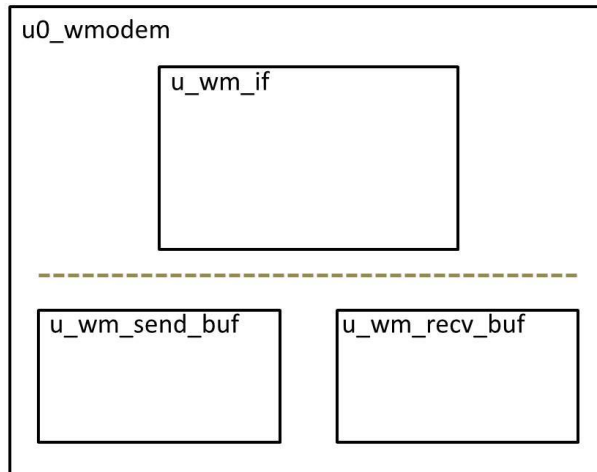


図 3.6: u0\_wmodem 内のコンポーネントを簡略化した図. 点線より上の u\_wm\_if で無線 LAN モジュールの初期設定と無線通信のほとんどを行う. 点線より下の u\_wm\_send\_buf と u\_wm\_rcv\_buf は送受信データのバッファの役割を果たす.

### 3.2.1 無線通信コンポーネント

無線通信コンポーネントは2つのコンポーネントからなっている. 一つは無線 LAN モジュールに向かってデータを送信するプロセス, もう一つは無線 LAN モジュールからデータを受信するプロセスである.

### 3.2.2 送信データ用バッファ

このコンポーネントは無線 LAN で送信するデータを格納するバッファの役割を担っている. u0\_wm\_modem から送信データを受けると, u\_txbuf0 という Xilinx が提供しているデュアルポートブロックメモリに格納する. txbuf はデータ入力ポートは 32bit だが, データ出力ポートは 8bit と 32bit の 2 系統のポートがある. 幅 8bit の場合は深さ 2048, 幅 32bit の場合は深さ 512 のメモリサイズということになる.

そして, 送信するデータのポインタを u\_txbuf0 に入力すると, 送信データが 8bit ずつ無線通信コンポーネントに出力される. またバッファに格納されているデータを CPU に向かって出力することもできる. CPU のために用意されているポインタ入力部分にポインタを入力すると, そのポインタの示すデータが CPU に向かって 32bit で出力される.

### 3.2.3 受信データ用バッファ

このコンポーネントは無線 LAN を通じて受信したデータを格納するバッファの役割を担っている. 無線通信コンポーネントから受信データを受けると, u\_rxbuf0 という Xilinx が提供しているデュアルポートブロックメモリに格納される. u\_txbuf0 との違いは, u\_txbuf0 は入力 1 系統出力 2 系統なのに対し, u\_rxbuf0 は入力 2 系統出力 1 系統という点である. u\_rxbuf0 は, 無線通信コンポーネントから出力される 8bit のデータ入力ポートの他に, CPU からのデータを格納する 32bit のデータ入力ポートがある. u\_rxbuf0 は, 幅 8bit の場合は深さ 4096, 幅 32bit の場合は深さ 1024 のメモリサイズということになる.

u\_rxbuf0 に受信データが格納されると、受信されたという信号と受信データが格納されているアドレスが CPU に向かって出力される。そして CPU の動作状況に応じて、受信データを受け取るという信号が CPU から出力され、先程の CPU に出力したアドレスのデータを 32bit で CPU に出力する。

### 3.3 無線 LAN モジュール

TALE 実験は最大 10km の通信を行うため、送信電力の強いものが必要である。また、TALE 実験用の無線 LAN モジュールは既存の電子部品に組み込むため、インターフェースがシンプルであることが望ましい。その結果 Redpine Signals 社製無線 LAN モデム RS9110-N-11-02 が選定された。以下「レッドパイン」と呼ぶことにする。図 3.7 にレッドパインの外観写真、表 3.1 にスペックを示す。



図 3.7: Redpine Signals 社製無線 LAN モジュール RS9110-N-11-02.

項目	仕様
サポート規格	IEEE 802.11b/g/n
無線周波数	2.4~2.5 GHz
無線通信速度	1,2,5.5,11 Mbps
送信電力	17 dBm
ホストインターフェース	SPI,UART
電源電圧	3.3 V
動作温度	-40 ~ +85°C

表 3.1: レッドパインの仕様.

図 3.8 に FPGA とのインターフェースを示す。レッドパインは TA 実験で使用しているアドレスと異なり、非常にシンプルなインターフェースをしており、UART で FPGA とデータ通信を行う。TXD は FPGA からデータを受信するポート、RXD は FPGA にデータを送信するポート、RES はリセットのためのポートである。これらの UART ポートではデータ長は 8bit、パリティな

し、ストップビットは2bitで通信が行われる。図3.9にレッドパインのデータユニットを示す。緑色の部分がレッドパインによって設定される部分で、青色の部分がFPGAもしくはCPUによって書き込まれる部分である。

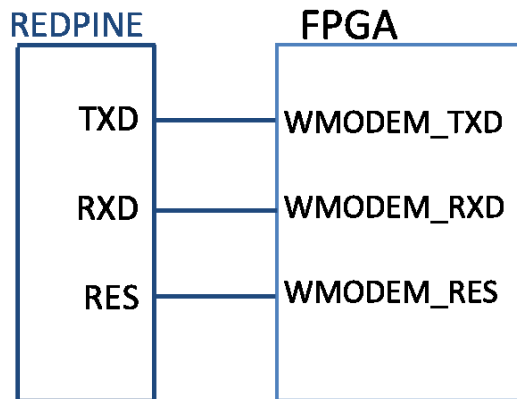


図 3.8: レッドパインと FPGA 間で使用されるポート。

物理ヘッダ 24 Byte	MACヘッダ 30 Byte	IPヘッダ 24 Byte	TCPヘッダ 24 Byte	TEXT FIELD ~1000 Byte	CRC 4Byte
------------------	-------------------	------------------	-------------------	--------------------------	--------------

図 3.9: レッドパインのデータユニット。TEXT FIELD には最大で 1000 Byte のデータを入れることができる。

電源電圧は 3.3V で、SD エレキではチャージコントローラから供給される。レッドパインは、3.3V の電源が供給され、RES ポートを High→Low→High にすると起動する。レッドパインはデフォルトではボーレート 115200bps で UART を通じた外部とのシリアル通信を行うが、以下の手順によってボーレートを変更することができ、TALE 実験では 921600bps を使用する。表 3.2 にレッドパインが検出可能なボーレートを示す。送信、受信は FPGA から見たものである。

1. 電源端子及びリセット端子に 3.3V 供給。
2. リセット端子を Low にする。
3. リセット端子に再度 3.3V 供給。
4. 約 100ms 待つ。
5. 0x1C を設定したいボーレートで送信する。
6. 0x55 を受信する。
7. レッドパインが 0x55 の送信をしなかった場合は、約 200ms 後に 5 に戻る。
8. 0x55 を送信する。

9. 起動メッセージ受信する.
10. もし、レッドパインが自動検出に失敗した場合は、FPGA による 0x55 の受信から 18 秒後に起動メッセージが受信され、115200bps で起動する.

9600, 19200, 38400, 57600, 115200, 300000, 230400, 460800, 921600, 1843200, 3686400
---

表 3.2: レッドパインの検出可能なボーレート (bps)

正常に起動した場合、以下のメッセージが受信される.

```
WELCOME TO REDPINE SIGNALS
```

```
Firmware upgrade (y/n)
```

```
Lording...
```

```
Lording Done
```

起動メッセージ受信後、以下の手順で無線送受信を行う.

1. Band コマンド - 周波数帯域設定
2. Init コマンド - 初期化
3. Scan コマンド - アクセスポイントのスキャン
4. Network コマンド - ネットワークタイプの設定
5. Join コマンド - アクセスポイントと接続
6. IP 設定コマンド - IP アドレス設定
7. TCP オープンコマンド - ソケットのオープン
8. Send コマンド - データの送受信
9. TCP クローズコマンド - ソケットのクローズ

レッドパインはシリアル通信を通じて FPGA から受け取ったコマンドに応じた動作をする。よって、エレクトロニクスでは、FPGA がレッドパインにシリアル通信でコマンドを発行しなければならない。エレクトロニクスにおいて、実際にシリアル送信しているコマンドについては 4 章で述べる。レッドパインは  $\r\n$ (キャリッジリターン CR + ラインフィード LF) をコマンドの終わりとして読み取るため、コマンドの最後には必ず  $\r\n$  を付ける。コマンドが正しく実行できたら、レッドパインはシリアル通信で “OK” と返し、実行されなかった場合には “ERROR” と返す。以下それぞれのコマンドについて説明する。

## Band コマンド

レッドラインが正しく起動したら、まずモジュールの使用する周波数帯を決めるコマンドを発行する。

- `at+rsi_band=band_val`

*band\_val* は 2.4GHz/5GHz を表すパラメータである。2.4GHz 帯を使用する場合は 0、5GHz 帯を使用する場合は 1 を設定する。このコマンドは起動後一番最初に入力する必要がある。

## Init コマンド

次に初期化を行うコマンドを発行する。

- `at+rsi_init`

このコマンドは `at+rsi_band` コマンドの次に入力しなければならない。

## Scan コマンド

次に全てのチャンネル、またはコマンドで指定したチャンネルのアクセスポイントのスキャンを行うコマンドを発行する。

- `at+rsi_scan=chan_num`

*chan\_num* ではチャンネル番号を指定する。ただし、0 を設定した場合、すべてのチャンネルのスキャンを行う。

## Network コマンド

次は無線 LAN モジュールのネットワークタイプを指定するためのコマンドを発行する。

- `at+rsi_network=net_type,type,chan_num`

*net\_type* にはネットワークタイプを指定する文字列を入れる。インフラストラクチャモード/アドホックモード (セキュリティなし) /アドホックモード (セキュリティあり) を指定する場合はそれぞれ、INFRASTRUCTURE/IBSS/IBSS\_SEC という文字列を入れる。インフラストラクチャモードとはアクセスポイントを介して通信を行う方法で、アドホックモードとは通信機器同士が直接通信を行う方式である。アドホックモードではアクセスポイントとなる Creator の SSID に最大で 3 台の joiner しか join することができないので、TALE 実験ではインフラストラクチャモードを使用する。

## Join コマンド

次はネットワークに接続するためのコマンドを発行する。また、アドホックモードの Creator の場合は IBSS ネットワークを作成する。

- `at+rsi_join=SSID,TxRate,TxPower`

*SSID* には、アドホックモードの Creator の場合は作成する IBSS ネットワークの SSID、その他の場合は `scan` コマンドで調べた SSID を指定する。*TxRate* では、送信データ速度を設定する。オートレートの場合は 0、1Mbps の時は 1、2Mbps の時は 2、5.5Mbps の時は 3、11Mbps の時は 4 を指定する。*TxPower* では、送信電力を指定する。Low Power(7dBm) の時は 0、Medium power(10dBm) の時は 1、High power(16~17dBm) の時は 2 を指定する。

## IP 設定コマンド

次は IP アドレスの設定を行うコマンドを発行する。

- `at+rsi_ipconf=DHCP_MODE,IP_address,SUBNET,GATEWAY`

*DHCP\_MODE* では IP アドレスを DHCP サーバから受けるかどうかを指定する。マニュアル設定の場合は 0、DHCP の時は 1 を指定する。*IP\_address* には指定する IP アドレスを入れる。DHCP の時は 0 を入れる。*SUBNET* には指定するサブネットマスクを入れる。DHCP の時は 0 を入れる。*GATEWAY* には指定するゲートウェイを入れる。DHCP の時は 0 を入れる。

## TCP オープンコマンド

TALE 実験ではタワーエレクトロニクスが SD に向かって呼びかけるという関係の無線通信を行うので、以下のコマンドは IP 設定後にタワー側のモジュールで実行されるコマンドである。

- `at+rsi_tcp=host,port,lport`

*host* には通信したい相手の IP アドレスを入れる。*port* には通信したい相手のポート番号を入れる。*lport* には通信したい相手のローカルポート番号を入れる。

## TCP リッスンコマンド

TALE 実験では SD は自発的に無線通信することはせず、常にタワーエレクトロニクスから受信を待っているため、以下のコマンドは IP 設定後に SD 側のモジュールで実行されるコマンドである。

- `at+rsi_ltcp=port`

*port* はリスニングするポートである。このコマンドは TCP リッスンソケットを開くもので、リッスンソケットが開かれた後、タワーから TCP オープンコマンドで呼びかけられるとコネクションが確立する。

## Send コマンド

データ送信をする際は、TCP オープン/TCP リッスンコマンドによってコネクションが確立された後に、以下のコマンドを実行する。

- `at+rsi_snd=hn,sz,Dip,Dport,stream`

*hn* には TCP ソケットハンドルを入れる。ソケットは最大 8 つまでオープンすることが可能で、ソケットハンドルとはソケットの何番目をオープンするかに対応している。確立されたコネクションのソケットハンドルは TCP オープンコマンドを実行した際の応答メッセージで確認することができる。*sz* には送信するデータのサイズ (Byte 単位) を入れる。*Dip* には送信先の IP アドレスを入れる。TCP ソケットを利用する場合は 0 を入れる。*Dport* には送信先のポートを入れる。TCP ソケットを利用する場合は 0 を入れる。*stream* には送信データを入れる。

ここで、レッドパインは `¥r¥n` をコマンド終了の合図として読み取ってしまうので、`¥r¥n` (16 進数で 0x0D,0x0A) を送信したい場合は 0xDB, 0xDC に置き換えて送信しなければならない。さらに、0xDB を送信したい場合は 0xDB, 0xDD に置き換えて送信しなければならない。すなわち 0xDB, 0xDC を送信する場合には 0xDB, 0xDD, 0xDC と置き換えて送信する必要がある。0xDB を送信した後に 0xDC または 0xDD が送信されない場合には Send コマンドはエラーとなるようになっている。

## データ受信

Send コマンドによってデータが無線送信され、データを受け取った無線 LAN モジュールは以下の書式を FPGA に向かって出力する。

- `AT+RSL_READ=hn,sz,stream`

*hn* には TCP ソケットハンドルが入っている。サイズは 1Byte である。*sz* には受信したデータのサイズ (Byte 単位) が入っている。サイズは 2Byte で、リトルエンディアンで記述されている。*stream* には受信データが入っている。

## TCP クローズコマンド

以下のコマンドはデータの送受信が終了した際にタワーエレクトロニクスで実行されるコマンド。

- `AT+RSL_CLOSE=hn`

*hn* にはクローズしたいソケットハンドルを入れる。

## 3.4 アクセスポイント

3.3 節でも述べたように、TALE 実験ではネットワークタイプとしてインフラストラクチャモードを使用する。インフラストラクチャモードではレッドパイン同士は直接通信せずにアクセスポイントを介して通信するので、タワーエレクトロニクスと SD エレクトロニクスの他にアクセスポイントが必要となる。TALE 実験用のアクセスポイントとして屋外での使用、遠距離通信、100 台以上の無線 LAN モジュールのネットワークへの参加が可能である必要がある。これらの条件を満たすものとして Cisco 社製 AIR-AP1572E-Q-K9 が選定された。AIR-AP1572E-Q-K9 の外観を



図 3.10 に、表 3.3 にスペックを示す。アクセスポイントには Cisco Wireless LAN Controller(以下 WLC) を用いて動作する Lightweight モードと WLC なしで動作する Autonomous モードが存在し、TALE 実験では Autonomous モードを使用する。デフォルトでは Lightweight モードになっているため、Autonomous モードで使用する際にはアクセスポイントのファームウェアを変更する必要がある。Autonomous モードのファームウェアは Cisco の公式サイトで取得することができる。ファームウェアの書き換えはアクセスポイントのコンソールポートで行うことができ、Cisco 社製 72-3383-01 RJ-45 DB-9 シリアルケーブルを用いた。Autonomous モードでのアクセスポイントのセットアップは LAN ケーブルで PC とアクセスポイントの PoE の Out ポートに繋ぎ、ブラウザで行う。アクセスポイントはタワーに設置され、アクセスポイントが作ったネットワークにタワーエレクトロニクスと SD エレクトロニクスが参加することでアクセスポイントを介して無線通信する。



図 3.10: Cisco 社製 AIR-AP1572E-Q-K9

項目	仕様
サポート規格	IEEE 802.11b/g/n
無線周波数	2.412~2.462 GHz, 11 チャンネル
無線通信速度	1,2,5.5,11 Mbps
受信感度	-103 dBm @ 1 Mbps -101 dBm @ 2 Mbps -93 dBm @ 5.5 Mbps -90 dBm @ 11 Mbps
送信電力	30 dBm
寸法 (高さ×幅×奥行き)	30.0 × 20.1 × 16.0 cm
重量	6.1 kg
動作温度	-40 ~ +65°C
電源オプション	AC:100 ~ 277 VAC, 50/60 Hz DC:10 ~ 16 VDC PoE

表 3.3: AIR-AP1572E-Q-K9 の仕様.

## 第4章 新規無線LANモジュールを用いた無線通信のためのファームウェア

TA 実験で使用している ADTEK 社製の無線 LAN モジュール ADLINK540F.RF では独自の通信プロトコルを用いて通信を行っていたのに対し、TALE 実験で使用するレッドパイーンでは一般的な TCP/IP プロトコルにより通信する。この章では TALE 実験用無線 LAN モジュールであるレッドパイーンを用いた無線通信のためのファームウェアについて詳しく説明する。さらに、TALE サイトで行った空気シャワーアレイとしての運用試験、そして長距離通信試験の結果を示す。

### 4.1 レッドパイーンの初期設定

レッドパイーンは、3.3V の電源が供給され、RES ポートを High→Low→High にすると起動する。レッドパイーンはデフォルトではボーレート 115200bps で UART を通じた外部とのシリアル通信を行うが、3.3 で述べた手順によってボーレートを変更することができる。FPGA-レッドパイーン間で通信可能な最も速いボーレートは 921600bps であったため、TALE 実験では 921600bps を使用する。ボーレートの変更が完了すると、起動メッセージが FPGA に向かって出力される。u\_wm\_recv は入力されるシリアル信号を常に 8bit のパラレルデータに変換しており、起動メッセージを検出すると u\_wm\_init に向かって起動完了信号を送信する。u\_wm\_init は起動完了信号を受信すると、モジュールの初期設定作業を行う。ここで、初期設定作業とは、タワーエレクトロニクスの場合は IP 設定コマンドまで、SD エレクトロニクスの場合は TCP リッスンコマンドまでをレッドパイーンにシリアル送信することである。初期設定作業において、それぞれのエレキで実際にレッドパイーンにシリアル送信する文字列を表 4.1 に示す。それぞれのコマンドは正しく実行できたらレッドパイーンはシリアル通信で “OK” と返し、実行されなかった場合には “ERROR” と返す。“OK” が返ってくると次のコマンドを実行するようになっており、“OK” が 10 秒以上返ってこない場合には RES ポートを一度 Low にし、その後 High→Low→High とすることでレッドパイーンをリセットし、もう一度最初から初期設定を行う。

タワーエレクトロニクス	<ul style="list-style-type: none"> <li>- at+rsi_band=0</li> <li>- at+rsi_init</li> <li>- at+rai_scan=0</li> <li>- at+rsi_network=INFRASTRUCTURE</li> <li>- at+rsi_join=TALETTEST01,3,2</li> <li>- at+rsi_ipconf=0,192.168.10.1,255.255.255.0,192.168.10.1</li> </ul>
SD エレクトロニクス	<ul style="list-style-type: none"> <li>- at+rsi_band=0</li> <li>- at+rsi_init</li> <li>- at+rai_scan=0</li> <li>- at+rsi_network=INFRASTRUCTURE</li> <li>- at+rsi_join=TALETTEST01,3,2</li> <li>- at+rsi_ipconf=0,192.168.10.<i>SD_ip</i>,255.255.255.0,192.168.10.1</li> <li>- at+rsi_ltcp=8765</li> </ul>

表 4.1: タワーエレクトロニクスと SD エレクトロニクスで実行される初期設定. ここで *SD\_ip* は SD の ip 番号が入るため, SD 毎にこの部分に ip 番号を入れたファームウェアを用意する必要がある.

## 4.2 タワーと SD 間の無線通信

レッドパインはシリアル通信を通じて FPGA から受け取ったコマンドに応じた動作をする. したがって, エレクトロニクスでは FPGA からレッドパインに TCP/IP 通信のためのコマンドをシリアル送信し, それに応じた動作をレッドパインが行うことで無線通信を行っている. 以下にタワーと SD 間の無線通信の流れを示す. 図 4.1 は概略図.

- SD エレクトロニクスが TCP リッスンコマンドを実行し, コネクションの待ち受け状態になる.
- タワーエレクトロニクスから待ち受け状態の SD に対して TCP オープンコマンドを実行し, TCP/IP 通信のためのコネクションを確立する. このときタワーエレクトロニクスは通信する SD の IP 番号を知る必要がある. SD 毎の IP 番号は CPU の `sd_idcode.c` というファイルにまとめられており, 無線通信実行時, すなわち `cpu_adl=4` の時に, `u0_wmodem` の入力ポートである `xdi32` に IP 番号が出力される. 以下にタワーの FPGA が実際にシリアル送信している文字列を示す.

- at+rsi\_tcp=192.168.10.*SD\_ip*,8765,2303

- コネクション確立後, タワーエレクトロニクスは送信データ分のデータを `u_wm_send_buf` から取得し, Send コマンドによって送信する. 以下にタワーの FPGA が実際にシリアル送信している文字列を示す.

- at+rsi\_snd=*hn,size,0,0,data*

- レッドパインはデータを受信すると "AT+RSI\_READ" という文字列を FPGA に出力する.
- 受信用コンポーネントである `u_wm_recv` は, "AT+RSI\_READ" という文字列を検出すると, データを受信したと判断し, その後に入力される受信データを `u_wm_recv_buf` 内のバッ

ファに入力する。バッファにデータが入ると、そのデータのポインタ、データ長が CPU に出力され、CPU がそのデータを出力するように FPGA に命令する。FPGA はそれを受けて `u_wm_recv_buf` 内のバッファから、受信したポインタにあるデータをデータ長さ分だけ CPU に送信する。

- SD エレクトロニクスは受け取ったデータからタワーエレクトロニクスからの要求を読み取り、それに対応するデータを Send コマンドにより送信する。
- タワーエレクトロニクスは SD からデータが返ってくると TCP クローズコマンドを実行しコネクションを切断する。以下にタワーの FPGA が実際にシリアル送信している文字列を示す。

– `at+rsi_close=hn`

- レッドパインはコネクションが切断されると ” AT+RSL\_CLOSE ” という文字列を FPGA に出力する。
- 受信用コンポーネントである `u_wm_recv` は ” AT+RSL\_CLOSE ” の文字列を検出すると、コネクションが切断されたと判断する。
- コネクション切断後、SD のエレクトロニクスはもう一度 TCP リッスンコマンドを実行しコネクションの待ち受け状態になる。

この流れを繰り返すことでタワーエレクトロニクスと SD は無線通信を行い、タワーエレクトロニクスは 1 秒の間に全 SD からデータを収集する。

### 4.3 通信不可状態からのデータ収集への復帰

レッドパインがアクセスポイントのネットワークから外れた場合や、コマンドを受け付けなくなった場合には TCP/IP 通信ができなくなり、データ収集ができなくなる。このような状況になったときに自動でレッドパインをリブートさせ、初期化動作からやり直し、データ収集に復帰させるプログラムをタワーエレクトロニクスと SD エレクトロニクスそれぞれのファームウェアに組み込んだ。3.3 節で述べた方法でレッドパインをリブートすることができ、レッドパインが正常に起動すると、もう一度 4.1 節で述べた初期設定を実行し、データ収集に復帰する。以下にタワーエレクトロニクスと SD エレクトロニクス、それぞれのリブート条件について示す。

#### タワーエレクトロニクスにおけるリブート条件

タワーエレクトロニクスにおけるリブート条件は、連続した 30 台の SD との無線通信ができなかった場合。タワーエレクトロニクスにおいてアクセスポイントから外れたときやコマンドを受け付けなくなったときには、全 SD との無線通信ができなくなり、データ収集が完全にできなくなる。そこで個々の SD にある場合とタワーエレクトロニクスにある場合を区別するために、リブート条件は連続した 30 台の SD との無線通信の失敗となっている。

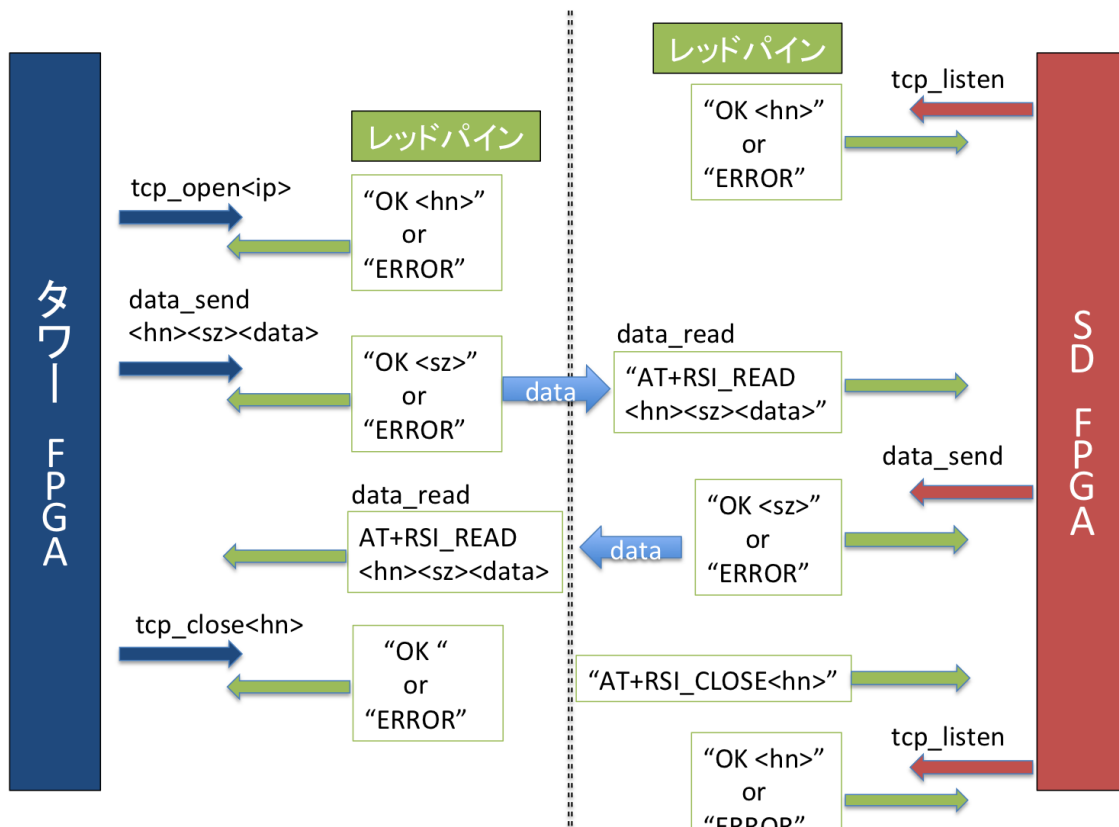


図 4.1: FPGA とレッドパインの命令の流れの概略図。左側がタワーエレクトロニクス，右側がSDエレクトロニクス。ここで ip はSD の ip 番号，hn はソケットハンドル，sz はデータサイズを表す。それぞれの命令は正しく実行できたらレッドパインはシリアル通信で”OK”と返し，実行されなかった場合には”ERROR”と返す。

## SD エレクトロニクスにおけるリブート条件

SD エレクトロニクスでのリブート条件は、タワーエレクトロニクスとの無線通信が 60 秒間行われなかった場合、60 秒間という条件は一時的な通信状況の悪化と完全に通信ができなくなった状態とを区別するためのものである。

## 4.4 空気シャワーアレイとしての運用試験

現在 TALE サイトには 400m 間隔と 600m 間隔の一部に SD が設置され、そのうち 16 台は TA 実験と同型のエレクトロニクスを用いて空気シャワーアレイとして稼働している。稼働している SD を図 4.2 に示した。空気シャワーアレイとしての運用試験では TALE サイトにて稼働している SD を使用した。

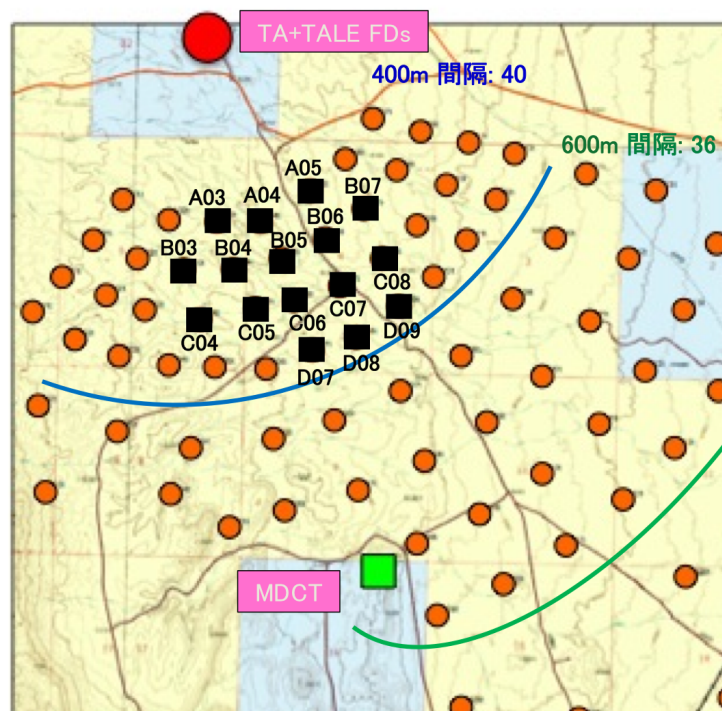


図 4.2: TALE サイトの拡大図。黒い四角で表されている SD が現在 TA 実験のエレクトロニクスで稼働している SD。

### 4.4.1 試験のセットアップ

TALE 実験用エレクトロニクスを用いた空気シャワーアレイとしての運用試験は、現在稼働している 16 台の SD を用いて行った。これらの SD の無線 LAN モジュールをレッドパインに取り替え、ファームウェアを書き換えて試験した。タワーエレクトロニクスは TALE 実験で稼働しているものとは別のエレクトロニクスを使用した。試験は PC からタワーエレクトロニクスにデータ取

集のためのコマンドを発行するという形で行い、両者の接続には LAN ケーブルと LANTRONIX 社製の XPORT という組み込み用小型デバイスサーバーを用いた。PC の OS は Windows7、ターミナルエミュレータは TeraTerm を使用。

アクセスポイントは 3.4 節で述べた Cisco 社製 AIR-AP1572E-Q-K9 を使用した。AC 電源供給用に GoalZero 社製 23000-Yeti-400-Solar-Generator を用意し、そこに Cisco 社製の Power Injector AIR-PERINJ1500-2 を接続し、そこから LAN ケーブルで PoE を使用してアクセスポイントに電源供給した。図 4.3 にそれぞれの外観を示す。



図 4.3: (左)GoalZero 社製 23000-Yeti-400-Solar-Generator. (右)Cisco 社製の Power Injector AIR-PERINJ1500-2

タワーエレクトロニクスとアクセスポイントは MDCT に設置し、データ収集を行った。しかし、TALE 実験用に開発したタワーエレクトロニクスでは 16 台の SD からデータ収集することはできなかった。TALE 実験では節 2.5.3 で述べたように、1 秒間に全 TALE-SD からデータ収集を行うが、開発したエレクトロニクスでは 1 秒間に 4 台の SD からしかデータ収集できなかった。データ収集できなかった理由はレッドパインにあった。レッドパインは TCP/IP 通信をする際、一度通信した相手の情報を記録し、二度目の通信からはその情報を用いて通信を行うことで通信時間を短縮している。しかし、記録しておける通信相手の台数は 4 台が最大であり、それ以上の台数と通信するには情報を書き換える必要がある。そして、この情報の書き換えには 1 秒近い時間がかかる。すなわち、データ収集の際に 5 台目の SD と通信しようとするや情報の書き換えが行われ約 1 秒の時間が経過し、データ収集が間に合わなくなっていた。記憶しておける台数の制限が 4 台であることはタワーエレクトロニクスだけの問題であり、SD エレクトロニクスでは問題にならない。なぜなら各 SD エレクトロニクスが無線通信をする相手はタワーエレクトロニクスだけであるからである。さらに、これはレッドパインのモジュール内部の問題であり、FPGA、CPU のファームウェアの問題ではない。この結果からタワーエレクトロニクスとしてレッドパインは使用できないことがわかった。

タワーエレクトロニクスとしてレッドパインを使用できないことは判明したが、SD エレクトロニクスが使用できるかを調べるために SD の台数を 16 台から 3 台に減らして空気シャワーアレイとしての運用試験を実施した。使用した SD は A04, B05, B06 の SD であり、3 台の SD でのデー



夕収集を約 20 時間行った。

#### 4.4.2 試験結果

データ収集の結果得られたアレイの稼働状況を図 4.4, A04 の SD のモニターデータを図 4.5 に示す。図 4.4 から 12 月 25 日 18 時に若干の通信エラーの増加が見られるが、安定して稼働していたことが稼働時間やトリガーレートから確認できる。約 20 時間の観測の間に空気シャワーは 31 個観測され、SD1 台あたりの無線通信のエラーレートも 1 %未満であった。トリガー頻度は次章で述べる期待されるトリガー頻度と矛盾せず、エラーレートに関しては、現在稼働している TALE-SD のエラーレートも 1 %未満であり、同程度のエラーレートで無線通信を行えていることがわかった。

次に図 4.5 の通信できている GPS 衛星数、バッテリー電圧、ミューオンピークやトリガー数を見ると SD が正常に稼働していたことがわかる。さらに、アレイの稼働状況で見られた 12 月 25 日 18 時の約 1 分 30 秒間の通信エラーがあることがわかる。これは 4.3 節で述べたリブートが A04 の SD で動作したためである。

これらの結果からタワーエレクトロニクス、SD エレクトロニクスともに正常に稼働しており、SD3 台であれば、TALE 実験用エレクトロニクスとアクセスポイントを用いて空気シャワーアレイとして運用することは可能である。

#### 4.5 長距離通信試験

TALE 実験でアクセスポイントを設置する MDCT から最も離れた SD との距離は約 10 km である。すなわち TALE 実験で使用するレッドパインとアクセスポイントは最低でも 10 km 離れた SD と通信できる必要がある。選定されたレッドパインとアクセスポイントで 10 km 以上の距離での無線通信が可能かを試験するために長距離通信試験を実施した。タワーエレクトロニクスとアクセスポイントに関しては空気シャワーアレイとしての運用試験と同様のセットアップで MDCT に設置した。10 km 以上 MDCT から離れた SD として TA 実験の SD1818 のアンテナを MDCT 方向に調整し、使用した。SD1818 は MDCT から 18.2 km の距離に位置する。MDCT と SD1818 の位置を図 4.6 に示す。長距離通信試験では受信した電波の強度を表す RSSI(Received Signal Strength Indicator) 値と、通信のエラーレートを測定した。

RSSI 値の取得には SD エレクトロニクスは使用せず、wivicom 社製 WVCMB-R-022-UART 評価キットを使用し、PC とレッドパインを接続した。評価キットの外観を図 4.7 に示す。PC の OS は Windows7、ターミナルエミュレータは TeraTerm を使用。レッドパインの電源は SD のバッテリーから供給した。節 4.1 で述べた SD エレクトロニクスの初期設定の IP 設定コマンドまでを PC から行い、その後 RSSI コマンドにより RSSI 値を測定した。実際に送信した文字列を以下に示す。

- at+rsi\_RSSI?

SD1818 での RSSI 値は-84 dBm であった。また、MDCT から距離 3.5 km の TALE-SD の A05 では-78 dBm であった。

エラーレートの測定では SD1818 の無線 LAN モジュールをレッドパインに変更し、TALE 用に開発したファームウェアに書き換え、使用した。約 5 時間データ収集プロセスを走らせ、SD1818 に毎秒通信することで測定した。10 分毎のエラー数を図 4.8 に示す。約 5 時間の測定においてエラーレートは 1 %未満であった。MDCT から約 3 km 離れた SD を用いた空気シャワーアレイとしての運用試験でのエラーレートも 1 %未満であり、18 km 離れた距離でも同じエラーレートで安定して無線通信できていることがわかる。

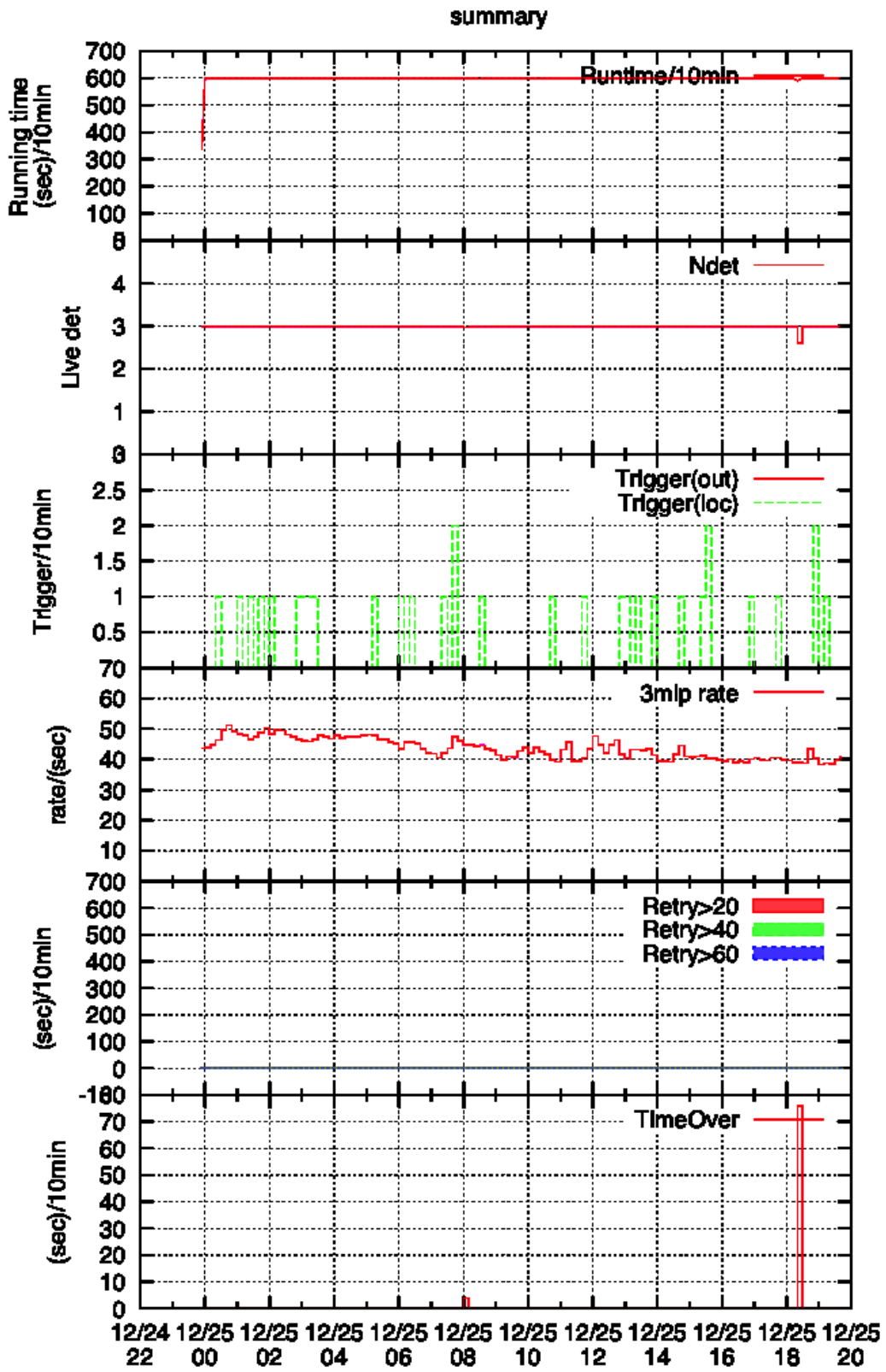


図 4.4: モニターデータ：summary. 上から稼働時間，稼働している台数，レベル2トリガーレート，レベル1トリガーレート，リトライ回数，タイムオーバーを表す。

DET A04

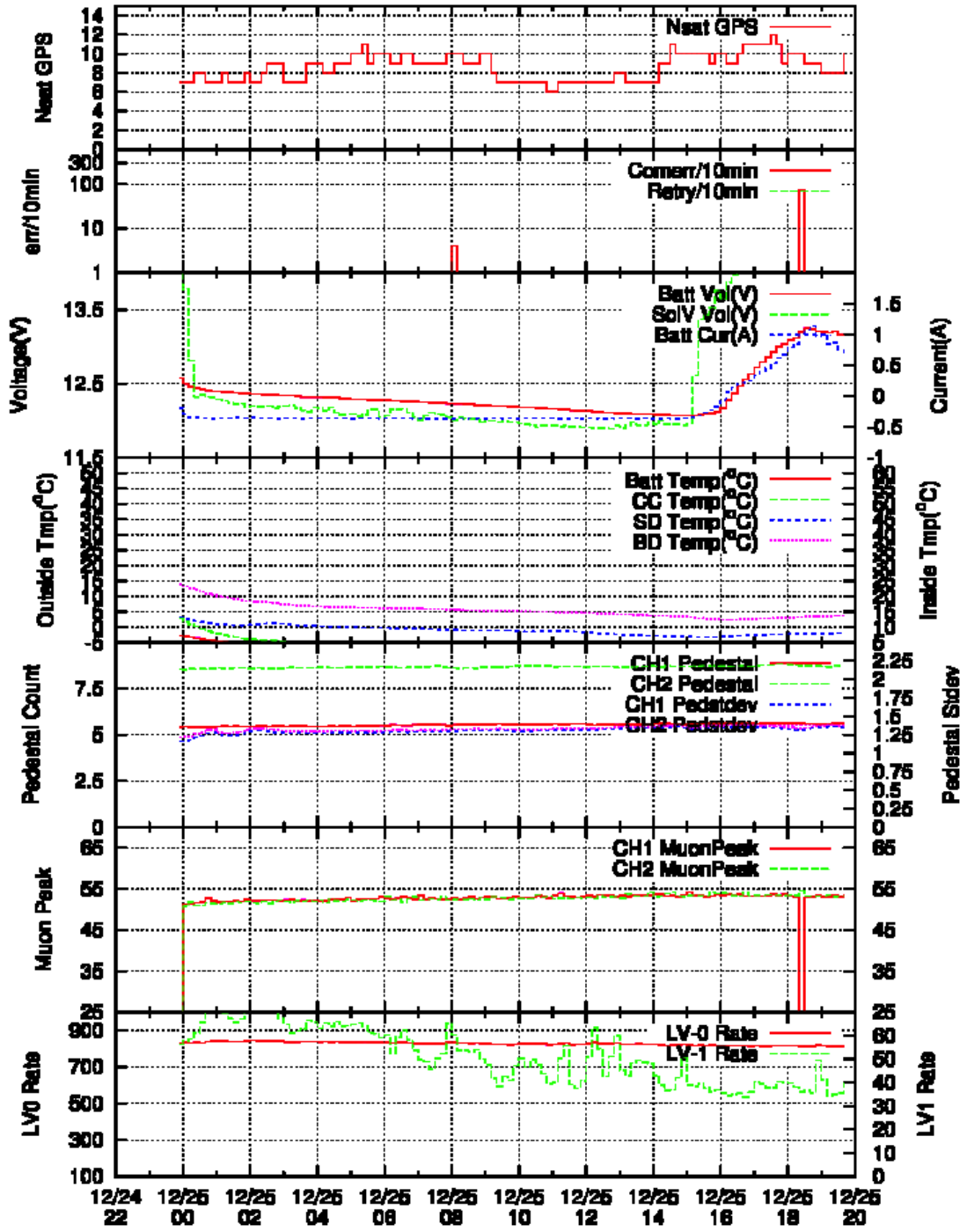


図 4.5: モニターデータ：A04. 上から通信できている GPS 衛星数，通信状態，バッテリー電圧，気温，ペDESTAL，ミュオンピーク，トリガーレートを表す。

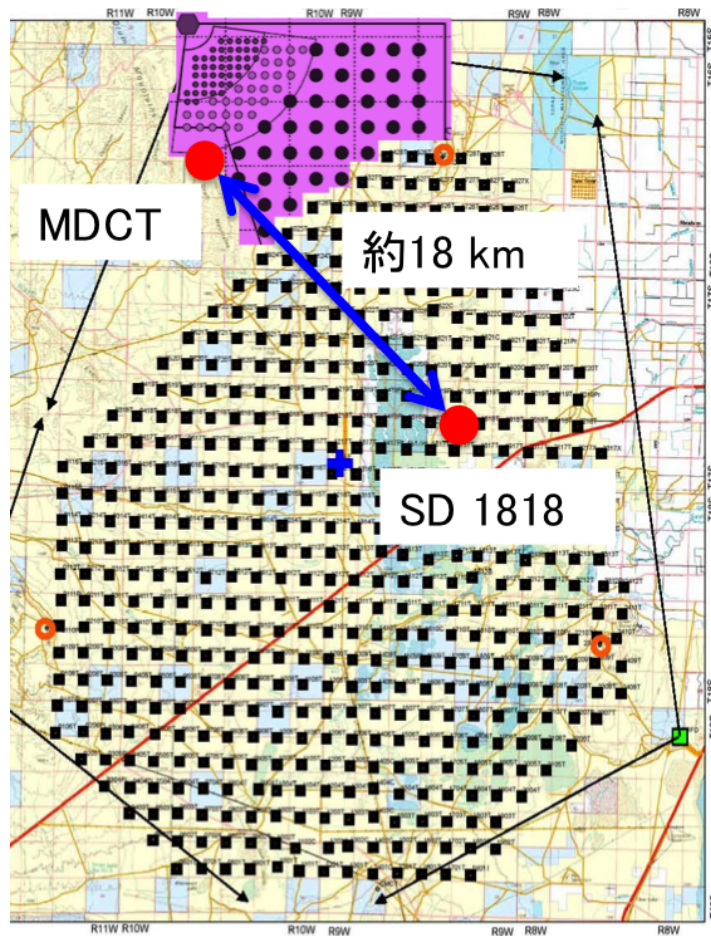


図 4.6: MDCT と TA-SD1818 の位置

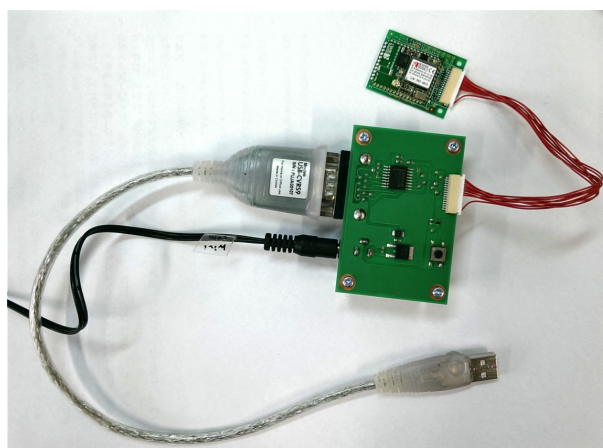


図 4.7: wivicom 社製 WVCMB-R-022-UART 評価キットの外観

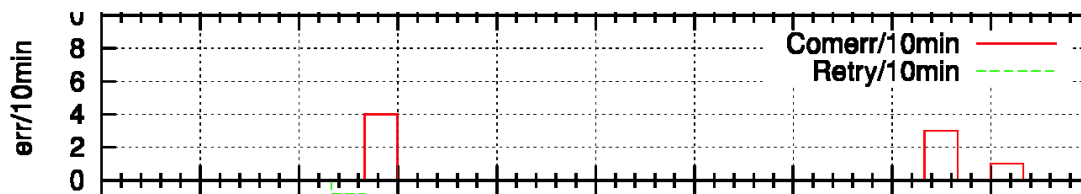


図 4.8: TA-SD1818 の 10 分毎の通信エラー数

TALE 実験において、MDCT から最も遠い SD との距離は約 10 km であるので、この試験結果から選定されたレッドパインとアクセスポイントは TALE 実験で求められる通信距離の条件を十分に満たしている。さらに、今回の試験から RSSI 値が -84 dBm 以上であれば、無線通信することができ、データ収集が可能であることもわかった。今回測定した RSSI 値は残りの 68 台の TALE-SD の設置の際に活用することができる。

#### 4.6 タワーエレクトロニクスから PC への移行

空気シャワーアレイとして、タワーエレクトロニクスとしてレッドパインを使用できないが、レッドパインの記録台数が 4 台という制限を除けば、タワーエレクトロニクス、SD エレクトロニクスともに空気シャワーアレイとして稼働できることが確認された。すなわち、タワーエレクトロニクスで実行していた動作をレッドパインのような制限のない媒体に変更して実行すれば良い。そこで、PC をタワーエレクトロニクスの代わりに使用し、PC とアクセスポイントを有線で繋ぎ、TCP/IP 通信を用いて PC から SD のデータ収集を行うことにした。2015 年 2 月現在、既に PC を用いたデータ収集プログラムの開発は進んでおり、1 秒間に 5 台の SD と TCP/IP 通信をすることに成功している。



## 第5章 TALE実験の現状とその性能

TALE 実験の SD は 2016 年 2 月現在，図 5.1 のように 400m 間隔の領域と 600m 間隔の領域の一部に合計 35 台が設置されている。さらに，そのうちの 16 台は TA 実験で使われているエレクトロニクスを用いて空気シャワーアレイとして運用されている。

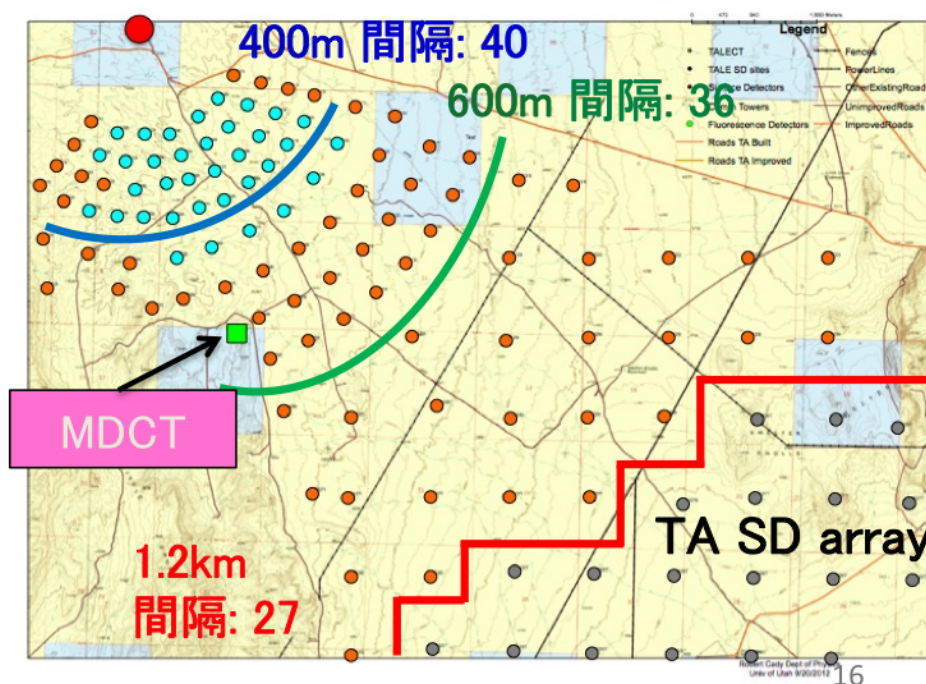


図 5.1: 水色の点は 2016 年 2 月現在で設置されている SD の設置点を示す。合計 35 台が既に置かれており，うち 16 台の SD は TA 実験のエレクトロニクスを用いて空気シャワーアレイとして稼働している。

図 5.2 の上のグラフは TALE タワーの稼働率で，一時的に稼働していない時期も存在するが 2013 年 5 月から 2015 年にかけて観測を続けていることがわかる。また，下の 3 つのグラフはそれぞれ 2013 年，2014 年，2015 年の 10 分毎のレベル 2 トリガーレートであり，10 分に 10 個前後のトリガーが発行されている。すなわち，一日で約 100 個の空気シャワーを観測している。

また，TALE 実験用 FD ステーションは 2012 年 11 月に完成しており，2013 年 2 月から観測を始めている。図 5.3 は TALE 実験用 FD と SD アレイで同時検出されたハイブリッドイベントの 1 例のイベントディスプレイである。

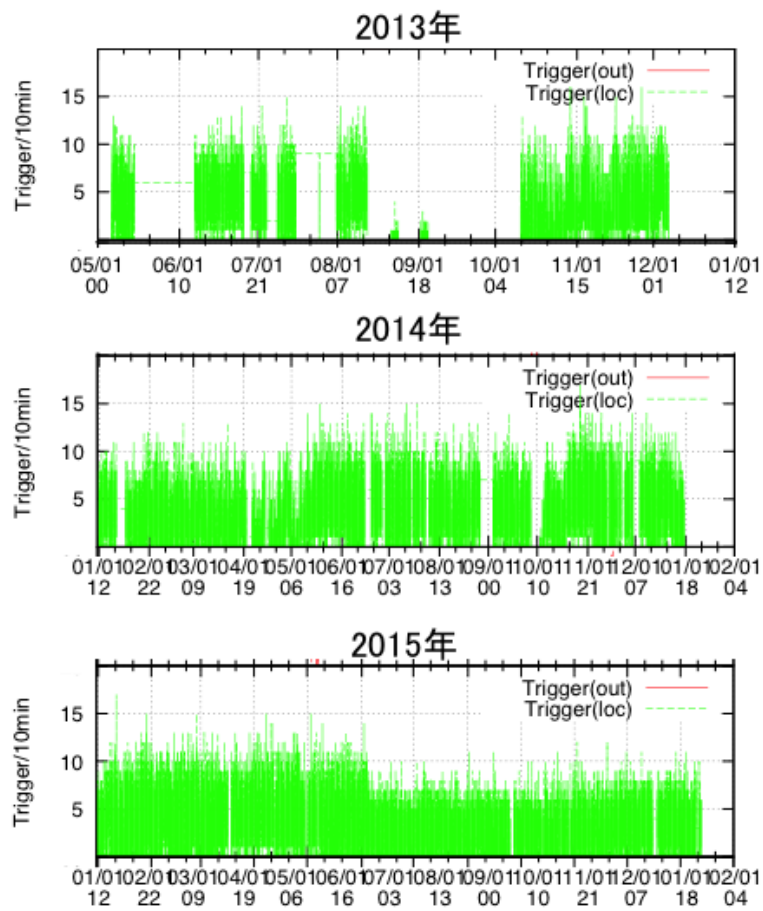
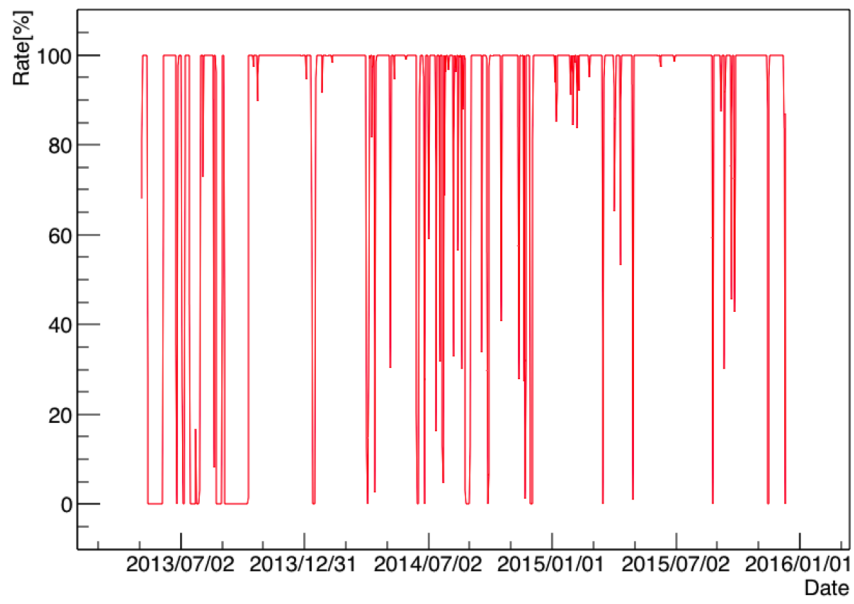


図 5.2: 2013 年 5 月から 2015 年 12 月までのタワーの稼働状況と 10 分毎のレベル 2 トリガーレート。



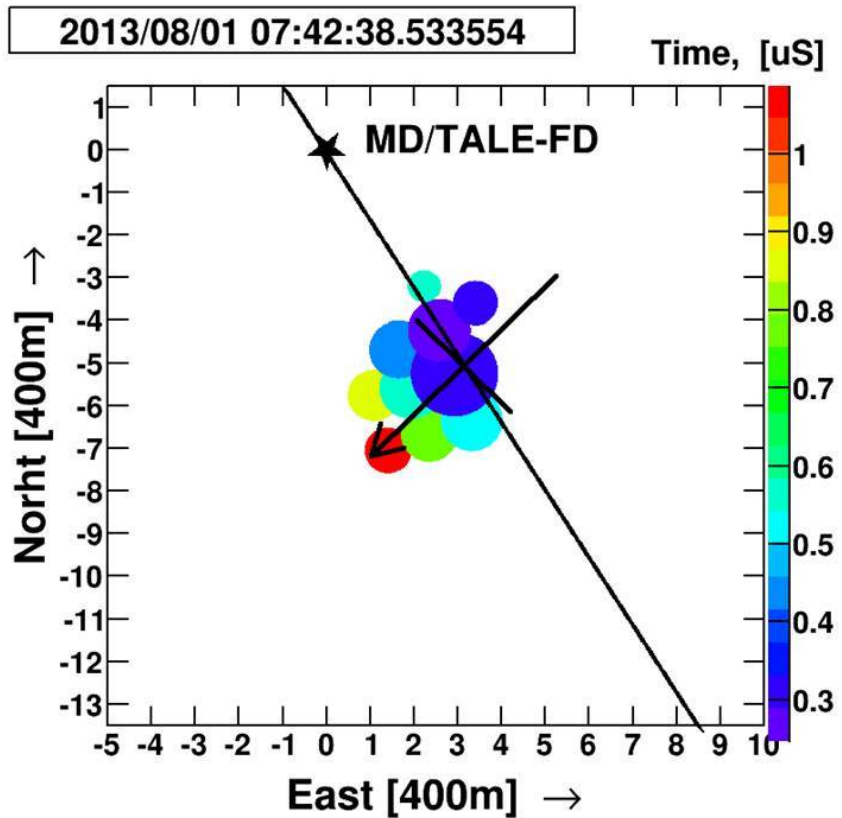
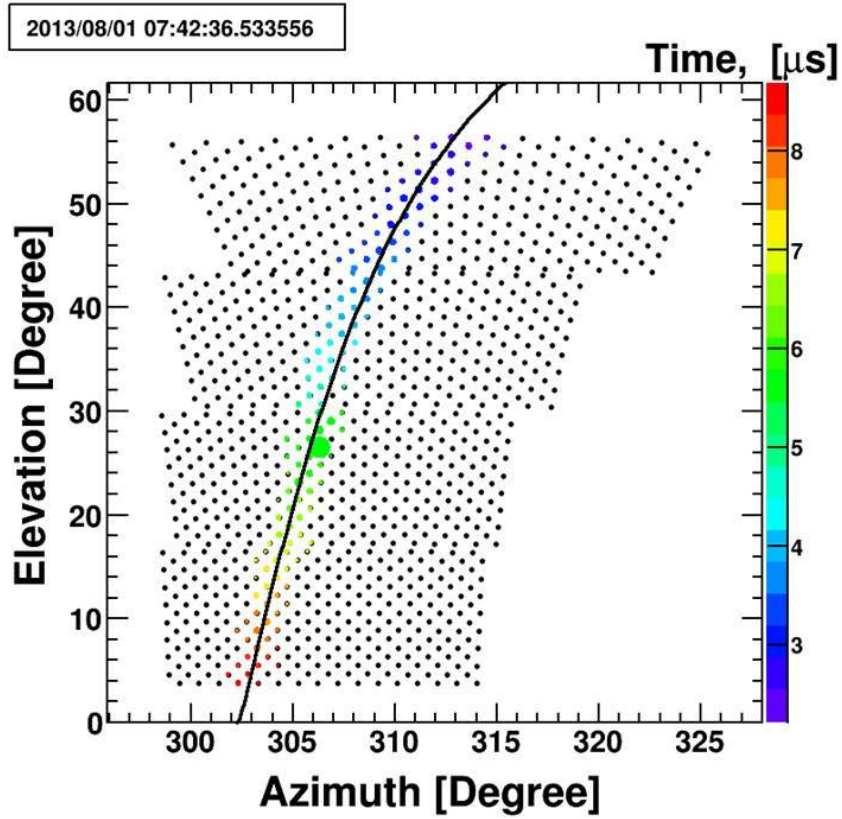


図 5.3: (上)FD によるハイブリッドイベントの 1 例のイベントディスプレイ. (下)SD によるハイブリッドイベントの 1 例のイベントディスプレイ.

TALE 実験用の SD エレクトロニクスが完成すると、図 5.1 に示したように、SD は FD ステーションから 3km 以内の領域に 400m 間隔で 40 台、3~5km の領域に 600m 間隔で 36 台、そして TA アレイと接続する領域に 1.2km 間隔で 27 台並べられる。SD が 400m 間隔で並べられる領域では  $3 \times 10^{16}$  eV 以上の空気シャワーに対して 100% の検出効率を持つ。また SD が 600m 間隔で並べられる領域では  $10^{17}$  eV 以上の空気シャワーに対して 100% の検出効率を持つ。

この TALE 実験の空気シャワーアレイで期待されるイベントレートはモンテカルロシミュレーションによって計算されている [26][27]。TALE 空気シャワーアレイで期待されるイベントレートスペクトラムを図 5.4 に示す。SD トリガーの最頻エネルギーは  $10^{16.5}$  eV で、トリガー頻度は年間約 50000 事象と予想されている。

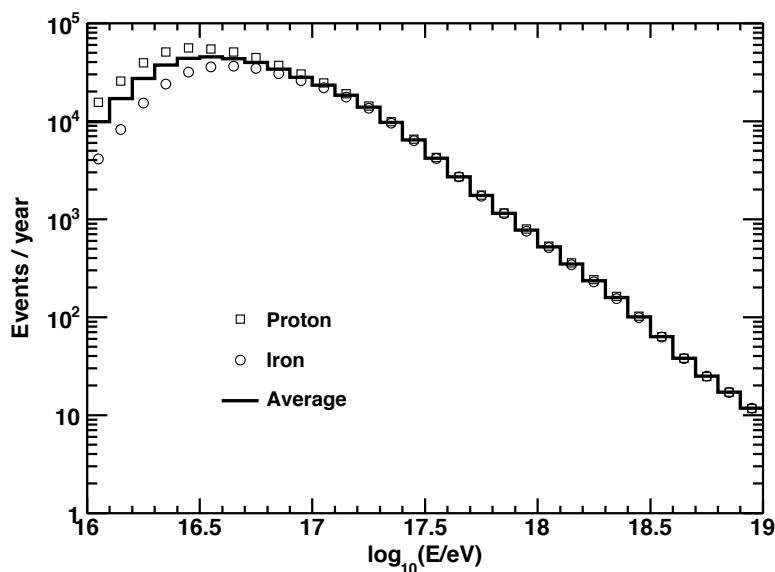


図 5.4: TALE 空気シャワーアレイによる観測で 1 年間に期待される一次粒子が陽子の空気シャワーと鉄の空気シャワーに対するトリガー数のスペクトル。Average はエネルギービン毎の陽子と鉄のプロットの平均を示している。最頻エネルギーは  $10^{16.5}$  eV で、年間約 50000 事象のイベントトリガーが期待される。

また、SD と FD によるハイブリッド観測のイベントレートスペクトラムを図 5.5 に示す。ハイブリッド観測による最頻エネルギーは  $10^{17.3}$  eV で”2nd knee”があると考えられている  $10^{17.5}$  eV よりも低く、年間約 5000 事象のトリガー数が期待される。これを TA 実験のハイブリッド観測と比較すると、最頻エネルギーは 1.2 桁下で、事象数は約 2 倍である。

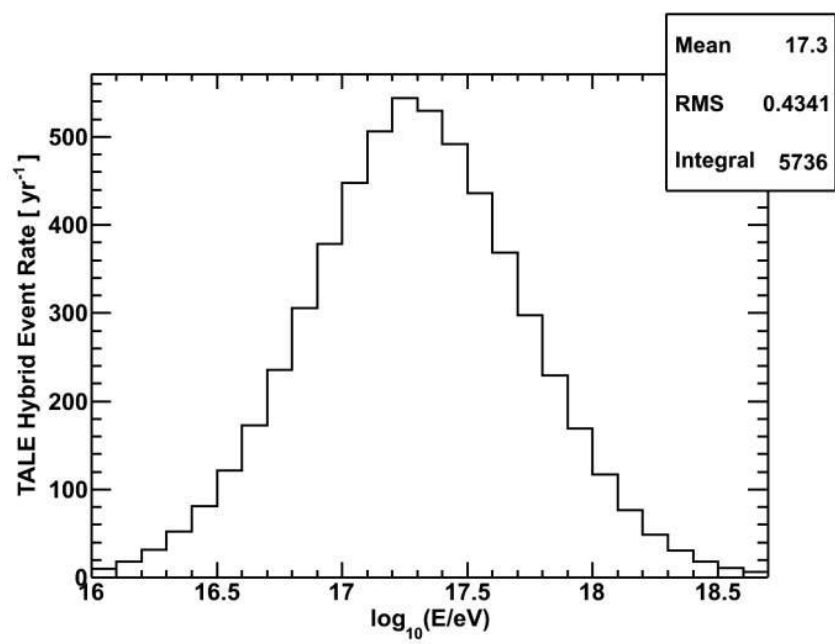


図 5.5: TALE 実験の 1 年間のハイブリッド観測から期待されるイベント数.

## 第6章 結論

TALE 実験用に選定された無線 LAN モジュールに合わせて、SD 用エレクトロニクス内の CPU と FPGA のファームウェアを新たに開発した。選定されたレッドパイン社の無線 LAN モジュールはホストインターフェイスに UART や SPI を採用しており、無線通信は一般的な TCP/IP プロトコルで行う。TA 実験で使用されている ADTEK 社製の無線 LAN モジュール ADLINK540F.RF は独自のプロトコルを使用したため、FPGA と無線 LAN モジュール間のインターフェース部分を大きく変更した。

また、作成したエレクトロニクスを用いて米国ユタ州の TALE サイトにて稼働している 16 台の SD での空気シャワーアレイとしての運用試験を実施した。その結果、作成した SD エレクトロニクスは空気シャワーアレイとして使用できることが確認できた。しかし、選定された無線 LAN モジュールを用いたタワーエレクトロニクスでは SD4 台までとしかデータ収集が行えないことがわかり、タワーエレクトロニクスで行っていた作業を PC などの他の媒体を用いて行うことが必要となった。そこで PC をタワーエレクトロニクスの代わりに使用し、PC とアクセスポイントを有線で接続し、TCP/IP 通信を用いて PC からデータ収集を行うことにした。PC を用いたデータ収集プログラムの開発は既に進んでおり、現在 5 台の SD との TCP/IP 通信に成功している。さらに、4 台という制限を除けば開発したエレクトロニクスは空気シャワーアレイとして運用できるのかを試験するために、SD3 台での空気シャワーアレイ運用試験を実施した。結果 20 時間の観測で 31 個の空気シャワーの観測に成功し、SD1 台あたりのエラーレートは 1% 未満と安定したデータ収集を行うことができた。他にも、選定された無線 LAN モジュールとアクセスポイントを用いた長距離通信試験も実施した。試験の結果から TALE 実験の最長通信距離である 10 km よりも十分に長い 18 km での安定したデータ収集が可能であることがわかった。そしてタワーから 18 km 離れた場所での RSSI 値は -84 dBm であり、距離 3.5 km では -78 dBm であった。この RSSI 値の情報は、残りの 68 台の TALE-SD 設置の際に活用することができる。

TALE 実験用エレクトロニクスを使って TALE 検出器を完成させると、SD トリガーの最頻エネルギーは  $10^{16.5}$  eV で、トリガー頻度は年間約 50000 事象と予想されている。SD と FD のハイブリッドトリガーの最頻エネルギーは  $10^{17.3}$  eV で “2nd knee” があると考えられている  $10^{17.5}$  eV よりも低く、このエネルギーで年間約 5000 事象のトリガー数が期待される。

# 謝辞

本研究に携わる機会を与えて頂き、研究を進めるにあたっては、全てにおいて数多くのご助言、ご指導頂きました大阪市立大学の荻尾彰一教授に深く感謝致します。また、幾度となくご助言、ご指導を頂きました大阪市立大学の林嘉夫名誉教授に深く感謝致します。

本研究のご助言を頂きました、常定芳基准教授、榊直人博士に深く感謝いたします。

東京大学宇宙線研究所の野中敏幸助教、木戸英治博士には本研究において数多くのご助言を頂きましたことを深く感謝致します。

毎週の研究室会議において議論して頂きました、愛知工業大学の小島浩司教授、大嶋晃敏准教授に深く感謝致します。

後藤昂司氏、東京大学地震研究所の山崎勝也博士には毎日の研究生生活の中で研究に関することのみならず多くの相談に応じて頂き、ご助言を頂きましたことを深く感謝致します。

徳島大学の櫻井信之博士には本研究において数多くのご助言して頂きましたことを感謝致します。

毎日の研究生生活の中で支えとなって頂きました大阪市立大学の和知慎吾氏、西本義樹氏、高橋優一氏、大野木瞭太氏、岸上翔一氏、Rosa Mayta Palacios 氏、佐原涼介氏、高木芳紀氏、京都大学の山本実加氏に感謝致します。

東京大学宇宙線研究所の佐川宏行准教授、福島正己名誉教授、竹田成宏助教、池田大輔博士、川田和正博士、武石隆治氏、神奈川大学の有働慈治助教、多米田裕一郎博士、信州大学の冨田孝幸助教、立命館大学の奥田剛司博士、シカゴ大学の藤井俊博博士、埼玉大学の井上直也教授、近畿大学の千川道幸教授、大阪市立大学の技術職員の松山利夫氏には、数多くのご助言を頂きましたことを感謝致します。

東京大学宇宙線研究所の竹田成宏助教、ユタ大学の J.N.Matthews 教授、Cosmic Ray Center 管理人の Dave Barr 氏、Cindy Barr 氏には、ユタでの生活、並びに本研究でお世話になりましたことを感謝致します。

大阪市立大学大学の川口幸子氏、大鶴淳美氏、東京大学宇宙線研究所の木次敦子氏、千田藍氏、大阪市立大学生協の田中琴美氏、甲斐笹弥香氏には数多くの事務処理を行って頂きましたことを感謝致します。

最後に、研究生生活を支えてくれた家族、友人に心より深く感謝致します。

なお、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(S)) H27~H31 「広エネルギー領域の精密測定で探る超高エネルギー宇宙線源の進化」、日本学生支援機構 H27 海外留学支援制度(協定派遣)「数学研究所がリードする理学の院生短期海外研究推進プログラム」、東京大学宇宙線研究所共同利用研究費の支援を受けて行いました。これらの関係機関の皆様へ感謝致します。

## 参考文献

- [1] M. Nagano, *New J. Phys.*, **11**, 065012(2009).
- [2] S. Ogio, F. Kakimoto, *Proc. 28th Int. Conf. Cosmic Rays.*, **1**, 315(2003).
- [3] T.K. Gaisser, "*Cosmic Rays and Particle Physics*", Cambridge University Press (1990).
- [4] A. M. Hillas, *Astron. Astrophys.*, **22**, 425(1984).
- [5] C. Thompson, R. Duncan, *Monthly Notices of the Royal Astron. Society*, **275**, 255(1995).
- [6] E. Waxman, *Monthly Notices of the Royal Astron. Society*, **307**, 491(1999).
- [7] E. Boldt, P. Ghosh, *Astrophys. J. Lett.*, **533**, L123(2000).
- [8] D. R. Bergman, et. al., astro-ph/0603797(2006).
- [9] K. Kamata, J. Nishimura, *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, **6**, 93(1958).
- [10] K. Greisen, *Progress in Cosmic Ray Physics III*.(ed.by J.G. Wilson), **27**(1956).
- [11] J. Linsley, et al., *J. Phys. Soc. Japan.*, Suppl A-III **91**(1962).
- [12] K. Greisen, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **10**, 63(1960).
- [13] J. Linsley, *Phys. G: Nucl. Phys.*, **12**, 51(1986).
- [14] T. Hara, *Proc. of 18th ICRC.*, **11**, 27(1983).
- [15] KASCADE-Grande Home Page, [http://www-ik.fzk.de/KASCADE\\_home.html](http://www-ik.fzk.de/KASCADE_home.html)(2016/02 現在)
- [16] A.A. Ivanov, et al., *EPJ Web of Conference* **53**, 04003(2013)
- [17] V.V. Prosin, et al., *EPJ Web of Conference* **99**, 04002(2015)
- [18] The IceCube Collaboration, *Proc. of 34rd ICRC*, 0334(2015)
- [19] A. Haungs, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0300(2013)
- [20] W. Apel, et al., *Phys. Rev.Lett.*, **107**, 171104(2011).
- [21] W. Apel, et al., *Phys. Rev.D.*, **87**, 081101(R)(2013).
- [22] S.P. Knurenko, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0053(2013)
- [23] T. Abu-Zayyad et al., *Astroparticle Physics*, 61, pp. 93101(2015).

- [24] R. Abbasi et al., *Astroparticle Physics*, 64, pp. 4962(2015).
- [25] 米田泰久, 修士論文 大阪市立大学 (2013).
- [26] S. Ogio, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0717(2013).
- [27] S. Ogio, et al., *EPJ Web of Conference* **53**, 08020(2013).
- [28] 木舟正 『新物理学シリーズ 34 宇宙高エネルギー粒子の物理学-宇宙線・ガンマ線天文学-』, 培風館 (2004).
- [29] 井上一 他編 『シリーズ現代の天文学 17 巻』 宇宙の観測 III -高エネルギー天文学, 日本評論社 (2007).