

TALE 実験地表検出器のための
新規データ収集システムの開発とその運用
(Development and operation of a new data acquisition system
for the TALE surface detector array)

理学研究科

数物系専攻

佐原涼介

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	2
1.1.2	宇宙線の加速機構	3
1.2	“2nd knee” 領域の宇宙線	4
1.2.1	宇宙線起源の銀河系内から銀河系外への遷移	4
1.2.2	宇宙線源分布の宇宙論的「進化」	4
1.2.3	LHC と空気シャワー現象	6
1.3	宇宙線観測と空気シャワー現象	7
1.3.1	空気シャワー現象	7
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	空気シャワーの観測方法	12
1.4	“2nd knee” 領域の宇宙線の観測結果の現状	14
1.4.1	エネルギースペクトル	15
1.4.2	質量組成	18
第 2 章	TA Low energy Extension 実験 (TALE 実験)	21
2.1	TALE 実験の目的	22
2.1.1	宇宙線起源の銀河系内から銀河系外への遷移の検出	22
2.1.2	宇宙線源分布の宇宙論的「進化」の解明	22
2.1.3	ハドロン相互作用モデルへのフィードバック	22
2.2	TA 実験	22
2.2.1	TA 実験の大気蛍光望遠鏡	27
2.2.2	TA 実験の地表検出器	27
2.3	TALE 実験の装置の外観	28
2.4	TALE 実験の大気蛍光望遠鏡	29
2.5	TALE 実験の空気シャワーアレイとトリガー DAQ サイクル	31
2.5.1	TALE 実験の地表検出器	31
2.5.2	SD エレクトロニクス	35
2.5.3	中央データ収集塔 (タワー) の基本構成	36
2.5.4	トリガー DAQ サイクル	37
2.5.5	トリガー DAQ サイクルにおける各種トリガー	39
2.5.6	モニターデータとモニタリングシステム	42

第 3 章	TALE 実験 SD アレイのための新型 SD エレクトロニクス	46
3.1	新型 SD エレクトロニクス	46
3.2	無線 LAN モジュールの変更	46
3.2.1	Redpine Signals 社製 RS9110-N-11-02 の性能	46
3.2.2	RS9110-N-11-02 の取り扱い方	48
3.2.3	UART コマンド	52
3.3	新型 SD エレクトロニクスのためのファームウェアの最適化	55
3.3.1	FPGA 用ファームウェア	55
3.4	中央制御計算機 (タワー PC) の導入	57
第 4 章	TALE 実験 SD アレイのためのタワーの新しい構成	59
4.1	アクセスポイント	59
4.1.1	アクセスポイントのタワーへの設置	62
4.2	タワー PC	63
4.2.1	タワー PC のタワーへの設置	64
4.2.2	タワー PC を用いての GPS モジュールの制御	65
4.2.3	タワー PC 上で動かすデータ収集のためのソフトウェア	67
第 5 章	TALE 実験 SD アレイのための新規データ収集システムの運用試験	73
5.1	運用試験のためのセットアップ	74
5.1.1	タワーおよび TALE 実験 SD	74
5.1.2	長距離通信試験	75
5.2	運用試験の結果とその後の改良・更新	75
5.2.1	タワー PC の稼働状況	75
5.2.2	取得した SD のモニターデータと通信エラー	76
5.2.3	タワーによる電力関連のトラブルとアクセスポイントの給電方法	81
5.2.4	タワー PC が SD1 台あたりの通信に要した時間	83
5.2.5	運用試験後のアップデート	84
第 6 章	TALE 実験 SD アレイ設置と運用	87
6.1	TALE 実験 SD の設置と新規システムへのアップグレード	87
6.1.1	タワーのセットアップ	87
6.1.2	SD の設置とエレクトロニクスのインストール	87
6.2	定常運転にむけてのアップグレード	90
6.2.1	データの保存方法	90
6.2.2	無線経由による SD エレクトロニクスのファームウェア更新システムの実装	91
6.2.3	DAQ に使用する SD の選択	91
6.2.4	DAQ 途中にハングアップした SD の削除	92
6.2.5	通信プロトコルを UDP へと変更	92
6.3	TCP から UDP へ	93
6.3.1	TCP と UDP の違い	93
6.3.2	タワー PC におけるソフトウェア変更点	93
6.3.3	SD エレクトロニクスにおけるファームウェアの変更点	94
6.3.4	SD エレクトロニクスのファームウェアの書き換え	96
6.3.5	タワー PC が SD1 台あたりの通信に要する時間	97

6.4	TALE 実験 SD の運用とその性能	98
6.4.1	DAQ の開始と停止	98
6.4.2	SD の GPS と位置測定	100
6.4.3	取得データの転送	103
6.4.4	モニターデータの作成	103
6.4.5	通信エラーレート	109
6.4.6	TALE 実験 SD アレイの空気シャワーイベント数	111
6.4.7	ハイブリッドトリガー	116
第 7 章 結論		118

要旨

宇宙線物理学の研究分野で、現在最も興味深いトピックスの一つは“2nd knee”である。“2nd knee”とは宇宙線の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。

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ことがこれまでのさまざまな観測からわかっている。しかしその一方で、より高エネルギーの $10^{18.2}$ eV \sim $10^{19.5}$ eV 領域において、Telescope Array (TA) 実験は宇宙線の主成分は陽子 100% と矛盾がなく、そうでなくとも軽い原子核が主成分であると結論している。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 程度である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のではないかと考えられていることから、この“2nd knee”の折れ曲がり構造は、宇宙線の起源がエネルギーの増加とともに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、小さな系統誤差で精密に測定するために、TA Low Energy extension (TALE) 実験が進んでいる。TALE 実験は TA 実験の検出可能な一次エネルギーの範囲を低エネルギー側に拡張する実験で、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 は約 70 km^2 にばらまかれて設置され、それぞれの SD が中央データ収集塔 (以下タワー) の中央制御計算機に無線通信でデータを送信するという形で地表検出器アレイとしての運用とデータ収集を行なう。タワーは 2012 年に設置が完了し、その翌年の 2013 年に 103 台中 35 台の SD が設置された。さらに 35 台中 16 台の SD には TA 実験と同型の SD 制御用エレクトロニクスがインストールされ、地表検出器として稼働していた。

TALE 実験の SD 全台稼働に向けて SD エレクトロニクスの量産の必要があったが、TA 実験用 SD エレクトロニクスで使用している無線 LAN モジュールの生産が中止したため、新規無線 LAN モジュールを選定した。本研究ではこの新規無線 LAN モジュールに合わせて、SD エレクトロニクス内の FPGA のファームウェアを新たに開発し、新型 SD エレクトロニクスを製作した。選定された新しい無線 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 プロトコルで行われる。TA 実験で使用されている無線 LAN モジュールは独自のプロトコルを使用していたため、新型 SD エレクトロニクスのファームウェアは FPGA と無線 LAN モジュール間のインターフェース部分に大きく変更を加えた。

さらに TALE 実験では、タワーに新たに無線 LAN アクセスポイントとタワーの中央制御計算機 (タワー PC) を LAN ケーブルで接続して配置し、タワー PC 上のソフトウェアで運用とデータ収集を行うことにした。このためのソフトウェアも新たに開発した。

ソフトウェアの完成後、米国ユタ州の TALE 実験地表検出器アレイ (14 台の SD を運用した) にて、新型 SD エレクトロニクス、アクセスポイント、タワー PC を用いた新規データ収集システムの運用試験を実施し、その結果、約 1 週間の安定稼働に成功した。

2017 年 2 月に未配置であった SD68 台全台の設置作業を実施し、それと同時にタワーの設備を新規データ収集システムのものへと変更した。2018 年 2 月現在は 87 台の SD について SD エレクトロニクスのインストールが完了しており、地表検出器アレイとして稼働している。

TALE 検出器が完成すると、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

宇宙線とは、宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線であり、1912年にオーストラリアの物理学者V.F.Hessによって発見された。宇宙線はこれまで 10^8 eVから 10^{20} eV以上までの広範囲のエネルギーで観測されている。宇宙線は大別して一次宇宙線と二次宇宙線とに分かれる。一次宇宙線とは宇宙空間から地球に降ってくる放射線の総称である。この一次宇宙線が地球の大気中の粒子と相互作用することによって大規模な二次現象(空気シャワー)を引き起こす。このときに発生する二次粒子のことを二次宇宙線と呼ぶ。宇宙線はエネルギーが大きくなるにつれ、観測数が少なくなることが知られており、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に一次宇宙線のエネルギースペクトルを示す。

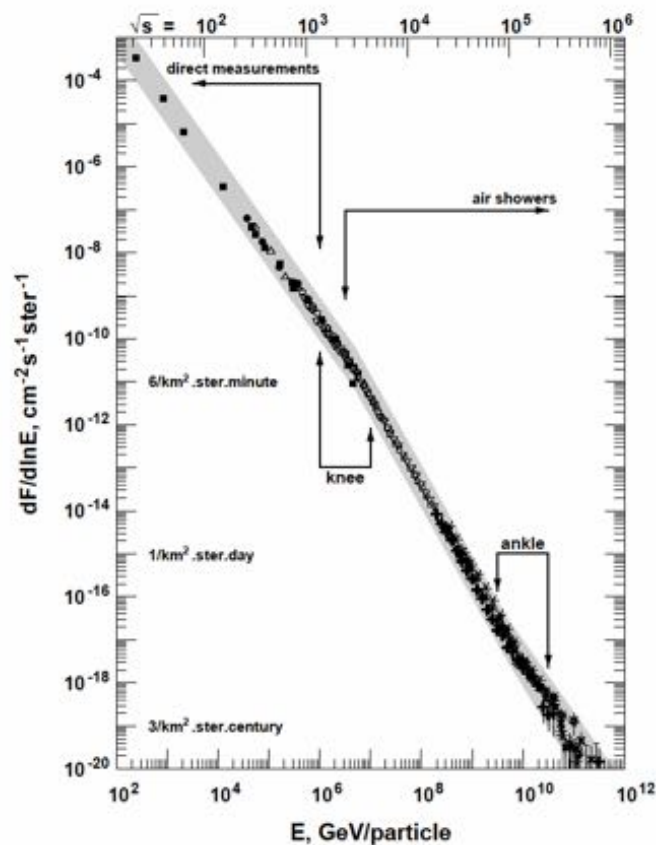


図 1.1: 一次宇宙線のエネルギースペクトル

1.1.1 宇宙線のエネルギースペクトル

太陽活動の影響を受けない 10^{10} eV を超えるエネルギー領域では、宇宙線の到来頻度はエネルギーのべき乗 $F(E) = K \times E^{-\gamma}$ で近似できる。 γ はほぼ3であるが、エネルギー領域によってわずかに異なる。宇宙線のスペクトルに構造があることを見るために、フラックスに E^3 を掛けたものを図 1.2 に示す。 10^{15} eV 付近までは γ は ~ 2.7 であり、そこから ~ 3.0 へと変化する。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方をそれぞれ “knee”、“2nd knee”、“ankle” と呼んでいる。これらの折れ曲がり構造にはいくつかの解釈があるが、そのうち有力だと考えられている解釈を以下で述べる。

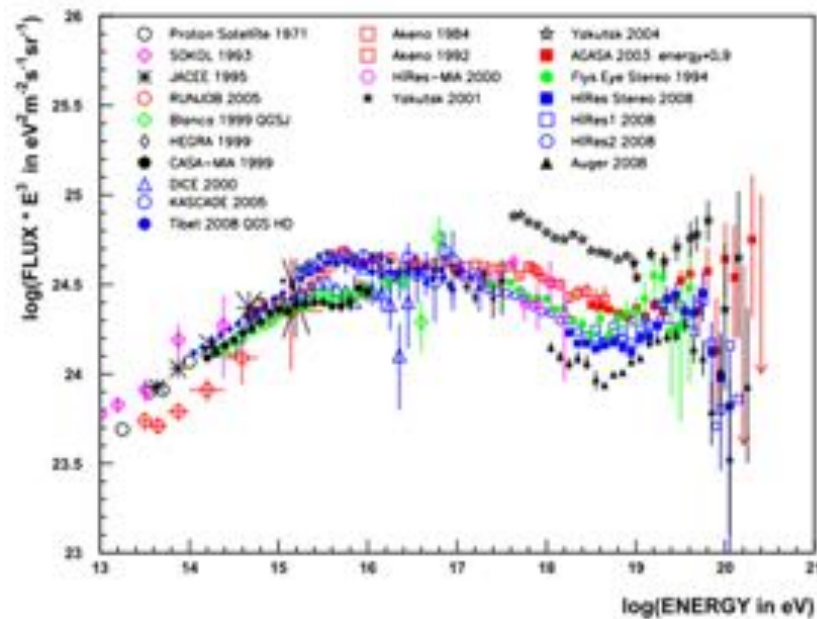


図 1.2: 一次宇宙線のエネルギースペクトル。 10^{15} eV、 $10^{17.5}$ eV、 $10^{18.5}$ eV 付近に折れ曲がり構造があることが分かる。[1]

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。実際にいくつかの超新星残骸からは高エネルギーガンマ線放射が観測されており、これらは超新星残骸で加速された宇宙線とその周辺の物質、または宇宙電子と光子場との相互作用の結果生成されたと考えられており、この説を間接的に支持するものである。[2]

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 $r_L \simeq 0.3 \text{ pc}$ 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銀河系内起源の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 [3]。

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 と同様に銀河系

内起源の宇宙線に対して銀河系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光子との相互作用、すなわち $p + \gamma \rightarrow p + e^+ + e^-$ で記述される電子対生成によるエネルギー損失によって生じてい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。この場合は $10^{17.5}$ eV 付近の “2nd knee” で銀河系内起源の宇宙線から銀河系外起源の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も “2nd knee” で変化していると予測される。

1.1.2 宇宙線の加速機構

宇宙線の加速機構については、多くの議論がなされているが、未だ解明されていないことが多い。また先に述べたようなべき型のエネルギースペクトルを満たすことが必須の条件となる。現在加速機構として有力だと考えられているのが「フェルミ加速機構」である [5]。

フェルミ加速

フェルミ加速は 1949 年に E.Fermi によって提唱された荷電粒子加速理論で、荷電粒子が星間磁気雲との衝突を繰り返すことで運動エネルギーを獲得し、加速されるという統計的な加速モデルである。この理論では、星間雲と荷電粒子の衝突方向はランダムであるが、統計的に見ると 1つの粒子の 1回の衝突あたりの平均的なエネルギー増加量 (ΔE) は粒子のエネルギーに比例する、つまり $\Delta E = \alpha E$ と仮定する。

粒子の初期エネルギーを E_0 とし、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。

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

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_{esc} とおくと、 n 回衝突後に加速領域に留まる確率は $(1 - P_{\text{esc}})^n$ となる。 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、フェルミ加速ではべき型のエネルギースペクトルが自然に導き出される。

宇宙線の加速モデル

宇宙線を高エネルギーにまで加速するメカニズムに関しては、未だ理論的にも観測的にも謎の部分が多い。粒子を高エネルギーに加速するためには、ある領域に閉じ込めたうえで少しずつエネルギーを与えていくことが必要である。しかし、銀河系内にはそれが可能な天体は見つかっていない。銀河系外の活動銀河核として知られる極めて活発な天体などが加速源として有力視されているが、未だ同定にはいたっていない。このように低いエネルギーの粒子を高いエネルギーにまで加速させるという考え方は宇宙線起源のボトムアップモデルと呼ばれている。これとは逆に極めて大きな未知の素粒子や暗黒物質が崩壊して超高エネルギー宇宙線として観測されるという考え方はトップダウンモデルと呼ばれている。最近の研究ではトップダウンモデルは否定的になっている [2]。

1.2 “2nd knee” 領域の宇宙線

“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り、この構造を解明することは宇宙線物理学という研究分野の中で、現在最も興味深いトピックの一つと考えられている。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 宇宙線起源の銀河系内から銀河系外への遷移

$10^{15.5}$ 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の結果によると、エネルギーの増加とともに一次宇宙線の平均質量数は徐々に大きくなり、主成分が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宇宙線のもれ出しによるもので、電荷の小さな原子核ほど銀河系内での閉じ込めが効かずに銀河系外に出て行ってしまい、結果としてフラックスが減少していくことによると考えられている。 $10^{15.5}$ eV での陽子成分の減少に始まり、このプロセスが順に鉄まで続くと考えられる。knee よりも 26 倍高いエネルギーである $\sim 10^{17}$ eV 付近では宇宙線の主成分が鉄となり、折れ曲がり “iron knee” が観測されるはずである。

それ以上に高いエネルギーの宇宙線の主成分はなにか。現在のところ、陽子以外の原子核が銀河系外で加速されているとしても、地球へやってくる宇宙線は銀河内空間で破碎され陽子が主成分となると考えられている。

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とが期待される。したがって、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、非常に広がるはずである。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。そしてこの遷移領域として “2nd knee” 領域が注目されている。

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エネルギーを損失する。これらのエネルギー損失の過程は、

宇宙線源から地球への伝搬距離に依存するため、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 1.3)。

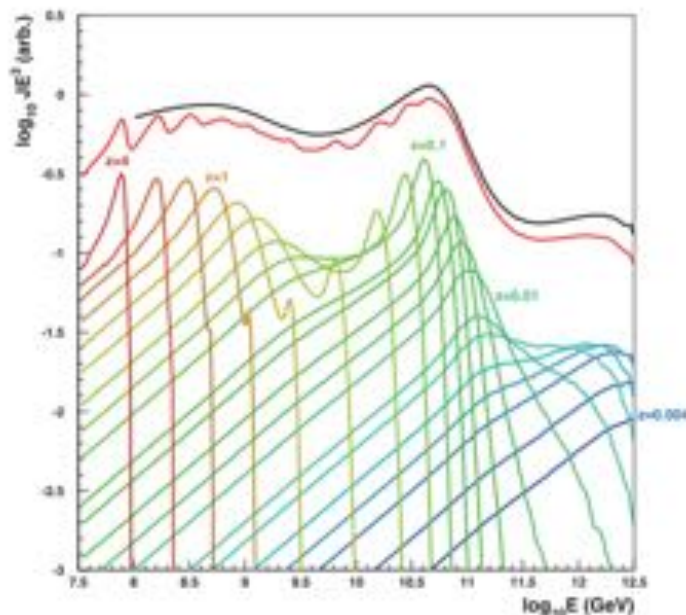


図 1.3: 各エネルギーで宇宙線フラックスに寄与する宇宙線源の赤方偏移量 z [6]

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 1.4 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 [6]。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できる。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できる。

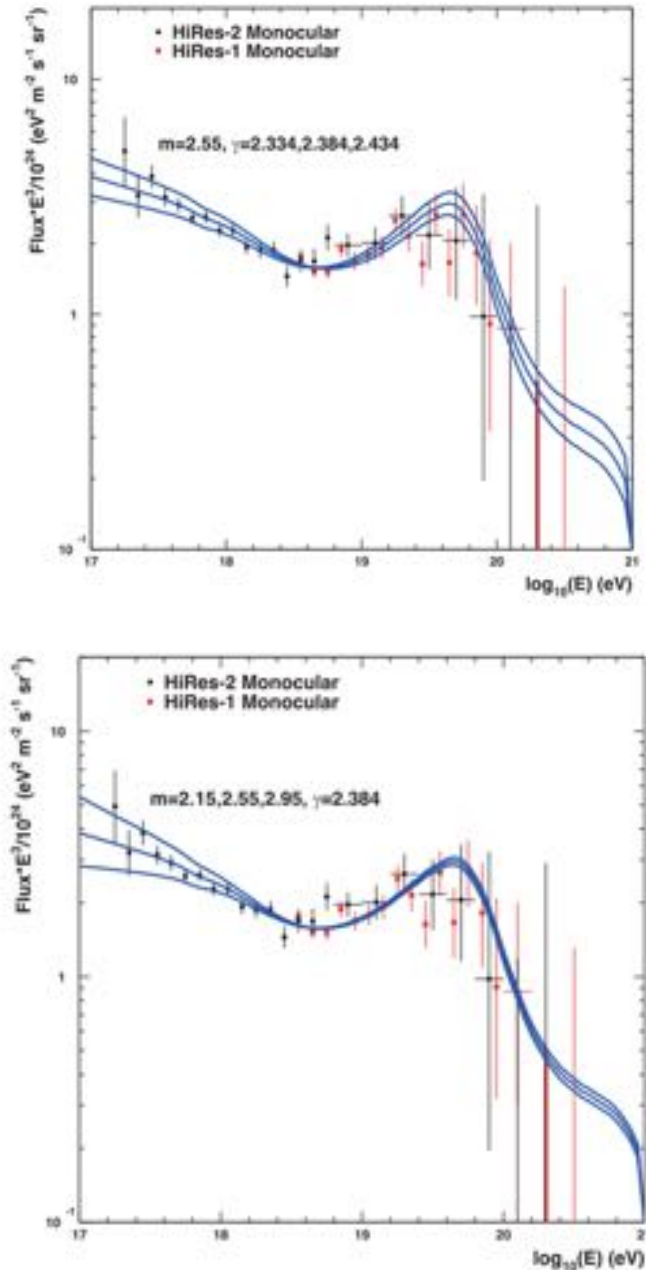


図 1.4: 極高エネルギー領域におけるエネルギースペクトルの構造へのスペクトルインデックスの変化の寄与(上)、evolution parameter(m)の寄与(下)。スペクトルインデックスの違いは、GZK 領域、“2ndknee” 領域の両方に現れるのに対して、 m の違いは“2nd knee” 領域で顕著であることがわかる [6]。

1.2.3 LHC と空気シャワー現象

現在 LHC(Large Hadron Collider) による最大到達エネルギーは実験室系に換算すると $\sim 10^{17}$ eV である。このエネルギー領域はまさに“2nd knee” 領域と重なる。したがって LHC 実験の結果と、“2nd knee” 領域の空気シャワー観測の結果は外挿なしに比較が可能である。LHC 実験による全

断面積などの新しい測定結果が空気シャワーの相互作用モデルに組み込まれれば、“2nd knee” 領域の空気シャワー観測は相互作用モデルのテストとして非常に有用になる。特に、 10^{17} eV での陽子・陽子あるいは陽子・原子核相互作用の全断面積や粒子生成の多重度の情報が加速器実験から得られれば、今よりさらに正確な X_{\max} のシミュレーションが可能になり、宇宙線の化学組成やエネルギーの決定精度が向上する。これは高エネルギーの宇宙線観測実験にとって極めて重要である。

1.3 宇宙線観測と空気シャワー現象

1.1 節で述べたように、宇宙線の到来頻度(フラックス)はほぼ E^{-3} に比例して減少するので、 10^9 eV から 10^{20} eV のエネルギー領域ではフラックスが 10^{30} 違う。低エネルギーの宇宙線は到来頻度が高く、大気原子核との相互作用によるエネルギー損失によって地上まで到達できないという特徴がある。したがって、 10^{14} eV 以下の低エネルギー宇宙線は、超高層大気または宇宙空間で飛行体搭載検出器(気球、人工衛星、宇宙ステーション等)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に、観測には大きな検出面積と長い時間が必要であり、飛行体搭載検出器による直接観測は難しい。しかし、一次宇宙線が大気と相互作用してできる二次宇宙線群(空気シャワー)が地表に到来するのでこれを利用した間接観測が行われている。

1.3.1 空気シャワー現象

大気中に一次宇宙線が入射すると、大気中の原子核と相互作用して二次宇宙線を生成する。さらにこれらの二次宇宙線も大気中の原子核と相互作用を起こし、粒子を生成していく。この過程を繰り返し、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。この様子を模式的に表したものが図 1.5 である。

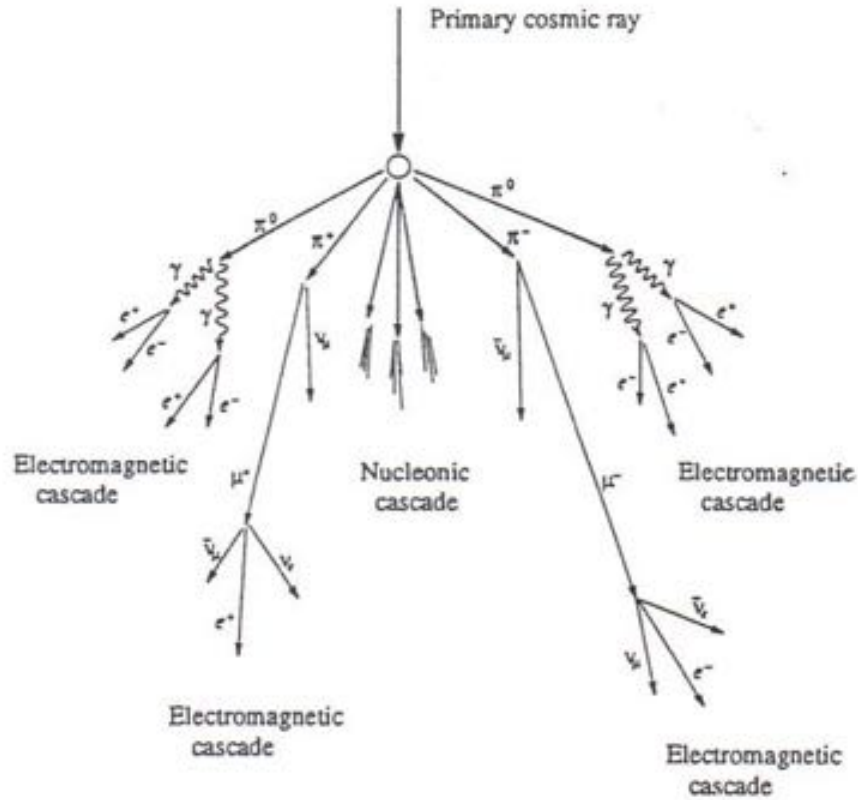


図 1.5: 空気シャワーの模式図

核カスケード

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衝突すると、陽子や中性子を叩き出し、また π 、 K などのハドロンの多重生成を起こす。この多重発生で生成されたハドロンがさらに多重発生を起こすことで結果的に大量のハドロンが生成される。これを核カスケードと呼ぶ。核カスケードで生成された二次粒子の大部分は結果的に π となる。これを π 中間子の多重発生と呼んでいる。

$$p^+ + p^+ \rightarrow p^+ + n + \pi^+ \quad (1.6)$$

$$n + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + \pi^- \quad (1.7)$$

$$n + p^+ \rightarrow p^+ + n + \pi^0 \quad (1.8)$$

そのうち π^0 は短い寿命 (8.4×10^{-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。 π^\pm の寿命は 2.60×10^{-8} s で、

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \quad (1.9)$$

のように崩壊し、 μ^\pm を生成する。 μ^\pm の寿命は 2.20×10^{-6} s で、

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1.10)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (1.11)$$

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 10 倍以上であるため、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。

電磁カスケード

高エネルギーのガンマ線は電子対生成によって電子と陽電子を作る。そして生成されたこれらの電子と陽電子は制動放射によってガンマ線を放出する。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。

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{brems.}} \simeq -\frac{E}{X_0} \quad (1.12)$$

ここで、 X_0 は電子のエネルギーが $1/e$ になる厚さで輻射長と呼ばれ、以下のような量である。

$$\frac{1}{X_0} = \frac{4Z^2 r_e^2 N}{137 A} \ln\left(184Z^{-\frac{1}{3}}\right) \quad (1.13)$$

ここで、 Z はターゲットとなる原子核の原子番号 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 g/cm^2 である。一方、電子対生成に対しては、

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

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、ガンマ線がつけられる現象を電磁カスケードと呼ぶ。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 E_c と呼び、空気中では $E_c \simeq 85 \text{ MeV}$ である [7]。一次宇宙線が原子核の場合の空気シャワーは核カスケードと電磁カスケードから構成され、ハドロンシャワーと呼ばれる。一方、一次宇宙線がガンマ線であった場合の空気シャワーはほぼ電磁カスケードのみで構成され、電磁シャワーと呼ばれる。

1.3.2 空気シャワーの縦方向発達

空気シャワーによって粒子数は増大していくが、いつまでも粒子数が増えていくというわけではない。それは、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が減少していくからである。高エネルギーの電子は主に制動放射によってエネルギーを失っていくが、制動放射よりも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 $E_c \simeq 85 \text{ MeV}$) にまでエネルギーが下がると、急激にエネルギーを失って大気に吸収されてしまう。したがって、シャワー中の粒子の総数はある段階で現象に転じる。このような空気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 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) が最大になるときに $s = 1$ となるパラメータである [5]。

一次宇宙線が陽子の場合に生成され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} はシャワーの最大発達時の粒子数、 X_{\max} はシャワー最大発達深さ [g/cm^2]、 X_0 は一次宇宙線の最初の相互作用点の深さ [g/cm^2]、 λ は縦方向発達の減衰長 (attenuation length) で 70 g/cm^2 である。一次宇宙線のエネルギーは N_{\max} に依存しており、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) の関係となる。また、一次宇宙線のエネルギーが同一である場合、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に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、エネルギーの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 1.6 に示す。

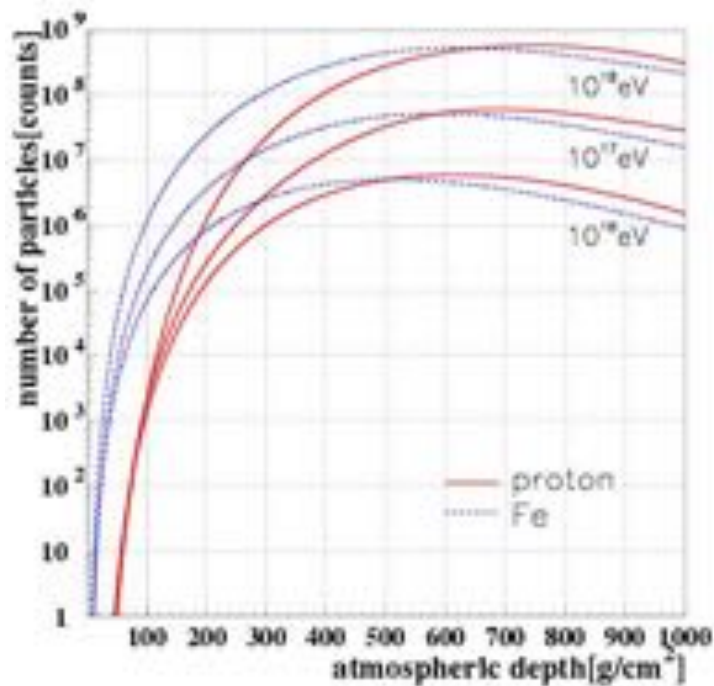


図 1.6: 空気シャワーの縦方向発達

1.3.3 空気シャワーの横方向分布

空気シャワーのシャワー軸と垂直な方向の粒子密度分布を横方向分布 (lateral distribution) と呼ぶ。空気シャワーの横方向分布は電磁シャワーとハドロンシャワーで異なる。

電磁カスケードは電荷を持った粒子が大量に発生するために、多重クーロン散乱によりシャワー粒子は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 [8]、Greisen により整理された NKG function が一般的によく使われる [9]。これによると電磁カスケードの中心からの距離 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。電磁シャワーは電磁カスケードのみで構成されるのでこれで良いが、ハドロンシャワーは純粋な電磁シャワー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 π_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 π_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が、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 π_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。これにより、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 [10]。これによると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 より遠いところ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 [10]。

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

いくつかのエイジにおける横方向分布を図 1.7 に示す。

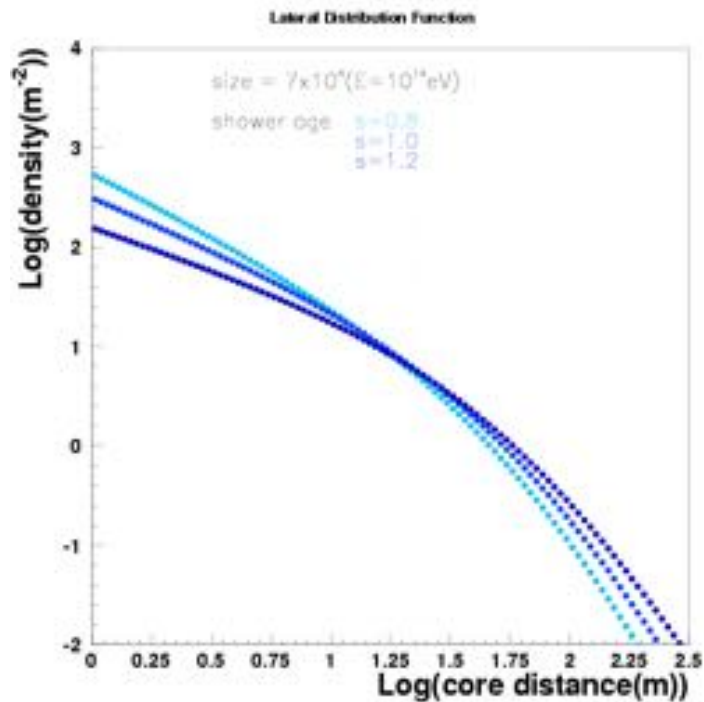


図 1.7: 空気シャワーの横方向分布

1.3.4 空気シャワーの観測方法

現在空気シャワーの観測方法には大きく分けて、空気シャワー粒子が大気中で発する紫外光(大気蛍光)を光学望遠鏡でとらえる方法、地表に到達する空気シャワー粒子を地表粒子検出器により検出する方法の2種類がある。

大気蛍光法

大気蛍光を観測する方法では、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中の電子は励起され、この電子が低い準位に落ちるときにエネルギーを蛍光として放出する。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1 m 通過した場合に発せられる大気蛍光光子数はおおよそ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 2×10^{15} 個に達し、その発光継続時間は $30 \mu\text{s}$ 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、おおよそ30 km 遠方からでも観測することができる。また、大気蛍光の放射は等方的であるので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。

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「空気シャワー軸の再構成」と「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。まず宇宙線の到来方向(=空気シャワー軸)の再構成を蛍光の軌跡から求める。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線がシャワー軸となる(図 1.8)。

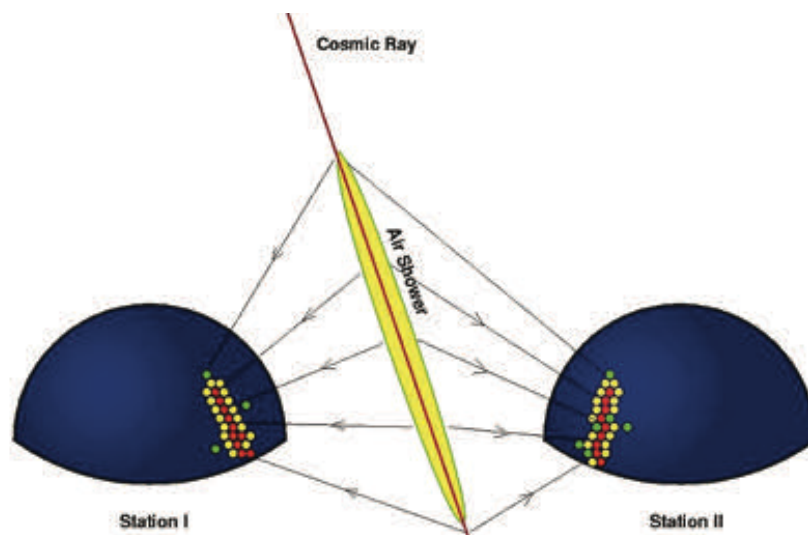


図 1.8: 大気蛍光による空気シャワーのステレオ観測の概念図

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。したがって、求められたシャワー発達曲線 $N_e(X)$ から式 (1.22) により一次宇宙線のエネルギー E_0 が決まる。

$$E_0 = \frac{\epsilon_0}{X_{\text{rad}}} \int N_e(X) dX \quad (1.22)$$

ここで、 X_{rad} は大気中での輻射長で 38.0 g/cm^2 、 ϵ_0 は大気に対する臨界エネルギーで 84 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_{max}) から、一次粒子の質量組成の測定が可能である。

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観測できるので、地表検出器に比べると得られる情報量が多く、一次宇宙線のエネルギーも、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できる。しかし、この方法でエネルギーを決定するには、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。また、大気蛍光法で観測するには条件として「月のない晴れた夜」であることが求められ、その観測効率は 10% 以下になるという不利な点がある。

地表粒子検出器による観測

粒子検出器を地表に多数配置し、到来する空気シャワー粒子を検出する装置を空気シャワーアレイと呼ぶ。空気シャワーアレイは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。この方法は大気蛍光法とは違って観測条件に天候や昼夜を問われないため、24時間365日の連続した観測が可能である。

地表に設置される粒子検出器として、水タンクを用いたチェレンコフ光検出器や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などがある。水タンクを用いたチェレンコフ検出器は、ミュオンが電子に比べて媒質中を通過できるという特徴を利用することでミュオンに感度を持たすことができる。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は全ての荷電粒子に感度を持つが、特にミュオン成分のみを選択的に検出するために、鉛等で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オン検出器を構成し、別に配置する場合もある。プラスチックシンチレータの特徴としては、応答がnsのオーダーでありシグナルの立ち上がり立ち下がりともに非常に良いので時間情報を分解能良く測定できる点、形状加工が簡単な点があげられる。

空気シャワーの粒子群は図 1.9 のように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。また、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モンテカルロ計算を必要とするので、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。

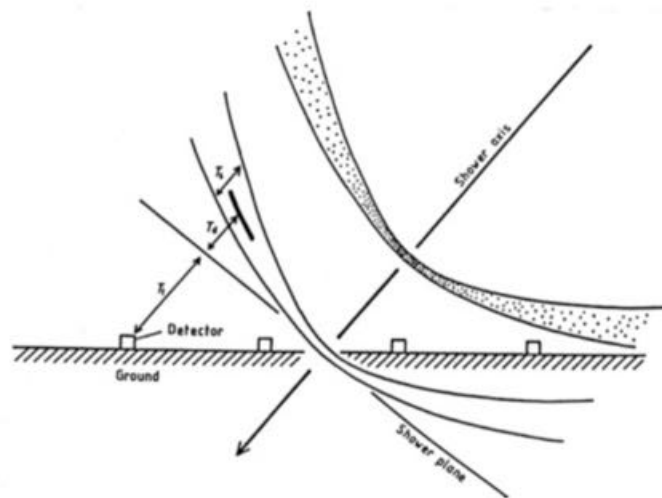


図 1.9: 地表付近の空気シャワー断面の概念図

1.4 “2nd knee” 領域の宇宙線の観測結果の現状

“2nd knee” 領域の宇宙線は 1.2 節で述べたように、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(した)実験として、KASCADE-Grande実験、Yakutsk実験、Tunka実験、IceCube実験がある。これらの実験の結果にはある程度の一致は見られるものの、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で展開されていた実験である。KASCADE-Grande 実験は KASCADE アレイの南西側に 10 m^2 のシンチレータ検出器を 137 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 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 m^2 のミュ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 [14]。

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実験である。58 台の地表シンチレータ検出器 (2 m^2) と地下に配置された 6 台のミュオン検出器 (20 m^2) で 8.2 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 $10^{15} \sim 10^{18}\text{ eV}$ のエネルギーを持つ宇宙線を観測する [15]。

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実験である。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 km^2 をカバーする。これによっておよそ $10^{15} \sim 10^{18}\text{ eV}$ のエネルギーを持つ宇宙線を観測している [16]。

IceCube neutorino 観測所の IceTop

IceCube neutorino 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実験である。検出器は球型のチェレンコフ検出器を 60 個ストリング状に水中に並べたもので、これが 120 m 間隔で 86 本、地表面から深く $1450\sim 2450\text{ m}$ 範囲に配置され、全体で 1 km^3 の検出体積を持つ。さらに上記とは別に、地表面付近に 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 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 $10^{15} \sim 10^{18}\text{ eV}$ のエネルギーを持つ宇宙線を観測している [17]。

1.4.1 エネルギースペクトル

図 1.10、図 1.11、図 1.12、図 1.13 に KASCADE-Grande 実験、Yakutsk 実験、Tunka 実験、IceTop 実験で報告されているエネルギースペクトルを示す。ここで各図における γ_i はスペクトルのべき指数である。エネルギースペクトルの γ_i の値とその変化である折れ曲がりの位置 (エネ

ルギー)が、異なった観測方法を持つ4つの実験において、エネルギーが 10^{17} eVから $10^{17.5}$ eVの間で γ_i が小さくなるという点で似た構造を持っていることがわかる。したがって、実験的にスペクトルにおける“2nd knee”の存在は確立されたと言える。

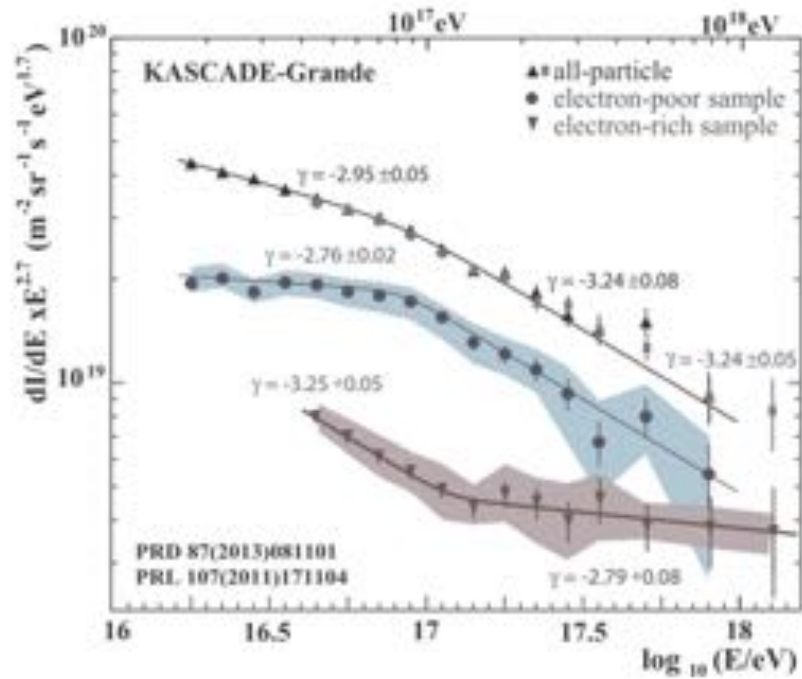


図 1.10: KASCADE-Grande 実験で観測されたエネルギースペクトル [18]。黒丸と青は muon rich、すなわち重一次原子核と思われるシャワーのエネルギースペクトル。下三角と茶色は muon poor、すなわち軽一次原子核によるとと思われるシャワー。上三角と四角は全粒子スペクトルで、灰色四角が 2011 年 [19]。上三角が 2013 年 [20] に発表した結果である。色付きの領域は系統誤差の範囲を表している。

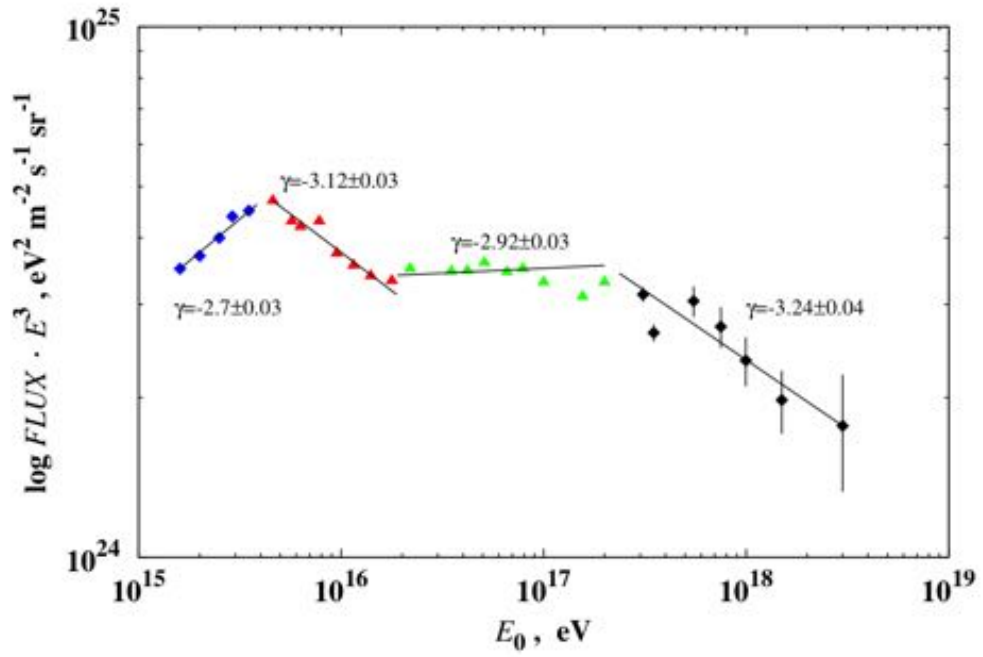


図 1.11: Yakutsk 実験で観測されたエネルギースペクトル [21]

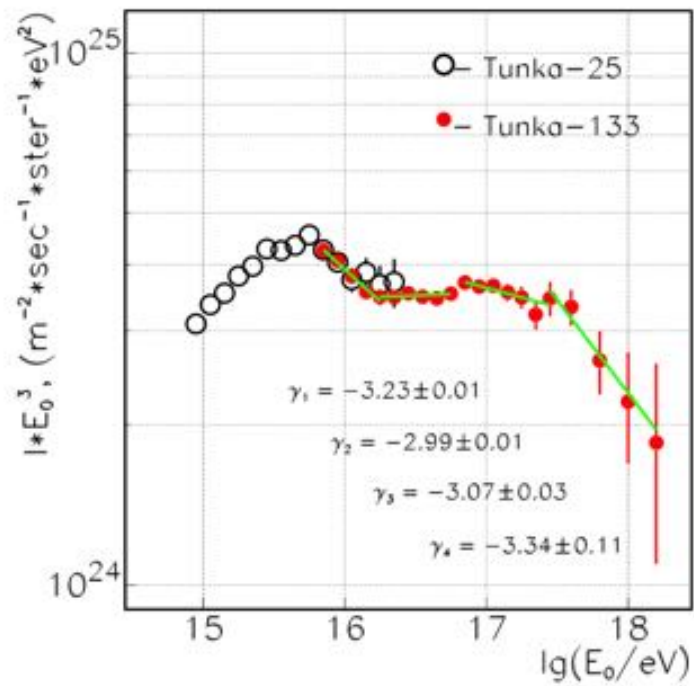


図 1.12: Tunka 実験で観測されたエネルギースペクトル [16]

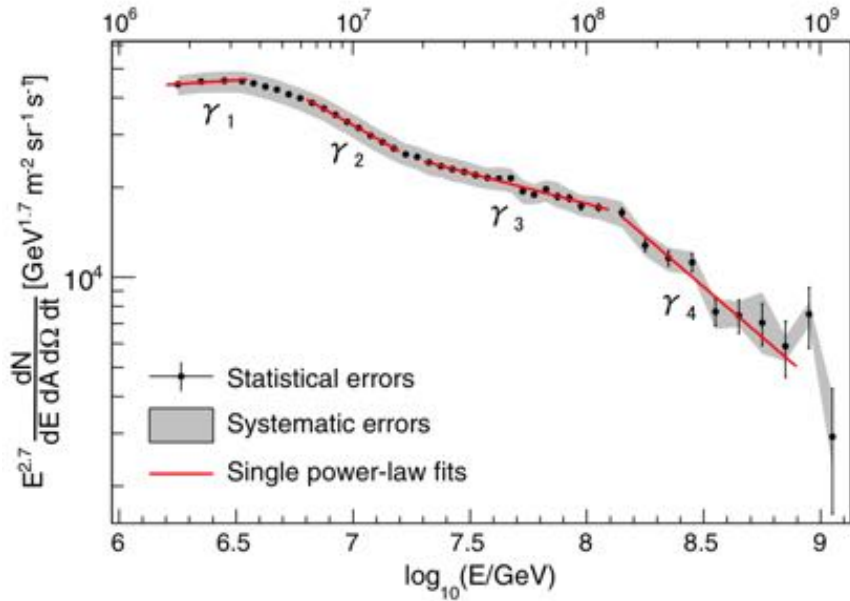


図 1.13: IceTop で観測されたエネルギースペクトル [17] $\gamma_1 = -2.63 \pm 0.06$ 、 $\gamma_2 = -3.13 \pm 0.03$ 、 $\gamma_3 = -2.91 \pm 0.03$ 、 $\gamma_4 = -3.37 \pm 0.08$

1.4.2 質量組成

図 1.14、図 1.15、図 1.16 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、縦軸は原子核の質量数の自然対数を取ったものである。

スペクトルにおける“2nd knee”の存在は、1.4.1 節で述べたように実験的に確立されているが、“2nd knee”付近のエネルギー領域での一次粒子種(質量組成)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は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という結果が出ている。また、図 1.10 の KASCADE-Grande では、全粒子のスペクトル(上三角)に対してエネルギーが $10^{16.2} \sim 10^{17.1}$ eV あたりまで重一次原子核成分(黒丸と青)の γ が小さく逆に軽一次原子核成分(下三角と茶色)の γ が大きい。これはエネルギーが $10^{16.2} \sim 10^{17}$ eV にかけては組成が重い原子核へと変化していることを意味している。それに対してエネルギーが $10^{17.1}$ eV あたり以降はそれぞれの全粒子のスペクトルからの γ の大小が逆転しており、これは一次宇宙線の組成が軽い原子核へと変化していることを意味している。よって KASCADE-Grande も Yakutsk、Tunka と似た一次宇宙線の組成の変化を示していることになる。

しかし IceTop 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という結果になっている。

“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。

このように、“2nd knee” のエネルギー領域の質量組成は大変興味深いトピックとされている。

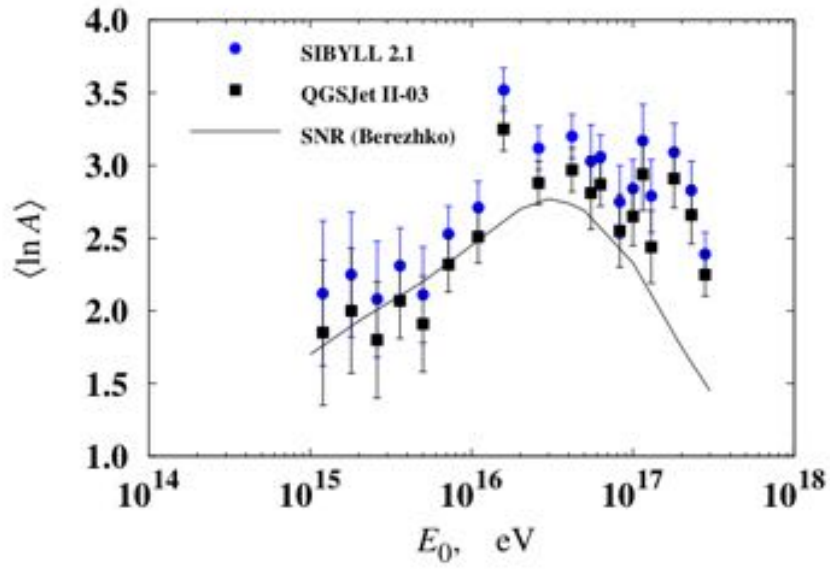


図 1.14: Yakutsk 実験で観測された質量組成 [15].

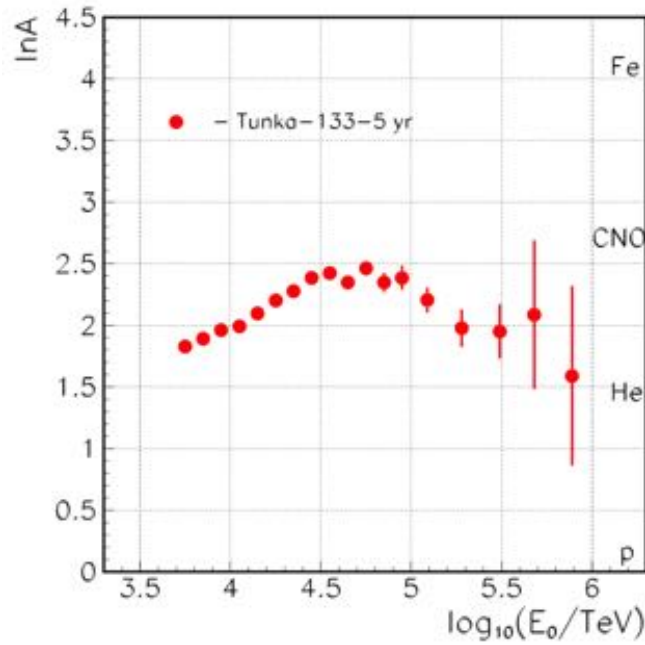


図 1.15: Tunka 実験で観測された質量組成 [16].

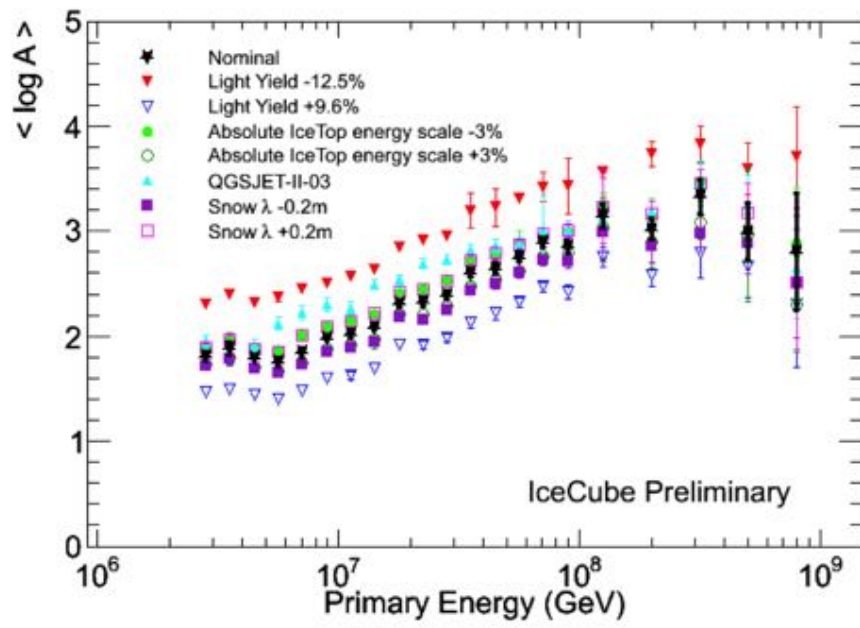


図 1.16: IceCube で観測された質量組成 [17].

第2章 TA Low energy Extension 実験 (TALE 実験)

Telescope Array 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 700 km² の空気シャワーアレイと、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 実験 (TALE 実験) は、TA 実験よりも低エネルギー領域の宇宙線を観測する実験で、TA 実験との同時観測と相互較正によって TA 実験のエネルギー範囲を $10^{16.5}$ から $10^{20.5}$ までの 4 桁に拡大し、シャワー再構成分解能に優れたハイブリッド観測 (図 2.1) でカバーする実験である。このエネルギー範囲は、銀河系内起源の宇宙線とその終わり、宇宙線源の銀河系内から銀河系外への遷移、銀河系外起源の宇宙線とその GZK 終端のすべてを含むエネルギー領域である。TA 実験+TALE 実験は統合された 1 つの実験であり、加速器で較正された唯一のエネルギースケールを用いて、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良く測定する。

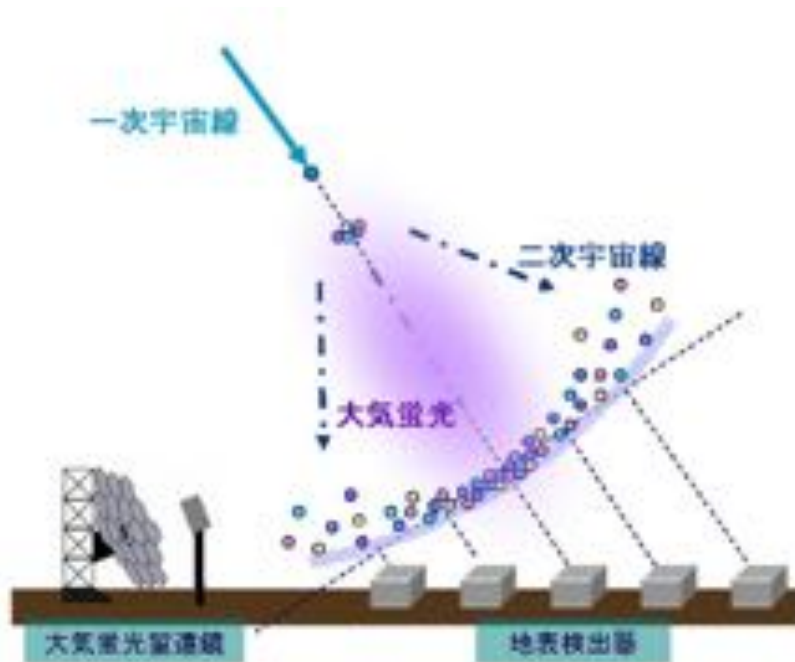


図 2.1: 空気シャワーのハイブリッド観測の概念図

2.1 TALE 実験の目的

2.1.1 宇宙線起源の銀河系内から銀河系外への遷移の検出

1.2 節で述べたように、“2nd knee” 領域では宇宙線の起源が銀河系内から銀河系外に遷移していると考えられている。この遷移領域の宇宙線は、鉄成分と陽子成分の両方を含むために X_{\max} 分布が非常に広がるはずである。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 とその分布幅のエネルギーに依存した変化を見つけ、銀河系内起源の宇宙線から銀河系外起源の宇宙線への遷移の決定的な証拠をつかむ。

2.1.2 宇宙線源分布の宇宙絵論的「進化」の解明

図 1.3 のように、“2nd knee” 領域では赤方偏移のパラメータ $z \simeq 1$ の宇宙論的距離にある宇宙線源の寄与が支配的だと考えられている。TALE 実験は、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って、小さい系統誤差でのエネルギースペクトルの測定を実現する。これにより “2nd knee” 領域 ($z \simeq 1$) から GZK カットオフ ($z \simeq 0.001$) までの宇宙線源の密度の変化を明らかにすることで、「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、新しく「進化」という座標軸を切り開く。

2.1.3 ハドロン相互作用モデルへのフィードバック

1.2 節で述べたように、“2nd knee” 領域は LHC のエネルギー上限 $\simeq 10^{17}$ eV と重なり、TALE 実験の結果と LHC での結果は同一エネルギーで外挿なしに比較可能である。そこで、地表検出器アレイによる 2 次元横方向分布、大気蛍光望遠鏡による縦方向発達、時間発展に加えて、電磁成分とミューオン成分の区別という第 5 の軸を加える事ができる。これにより、5 次元的なシャワー構造を LHC エネルギーで明らかにし、超高エネルギーハドロン相互作用物理の解明に貢献する。

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のモデル依存が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実験である。

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 km^2 である。FD ステーションは SD アレイ周辺の三ヶ所に約 35 km 間隔で設置され、方位角 108° 、仰角 3° - 33° でアレイ上空を観測している。一つのステーションに 12 台または 14 台の望遠鏡が設置され、全部で 38 台である。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 高い場所に置かれている。TA の検出器配置を図 2.2 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 つの異なる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。

これまでの観測では、図 2.3 のように $10^{18.2}$ 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。これらの構造はそれぞれ、電子・陽電子生成による dip($10^{18.7}$ eV)、GZK pileup($10^{19.4}$ eV)、GZK cutoff($10^{19.7}$ eV) によるものと解釈できる。また図 2.4 のように、 X_{\max} の測定結果から、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わかった。これらの結果を統合して、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。また、TA実験では57EeV以上のエネルギーを持つ宇宙線の到来方向分布について図2.5のように 5.1σ の有意度をもつ領域を観測し、この領域をホットスポットと呼んでいる。宇宙線の到来方向について等方的な分布を仮定した場合にこの 5.1σ の有意度をもつような偶然確率は 3.4σ であると計算されている。

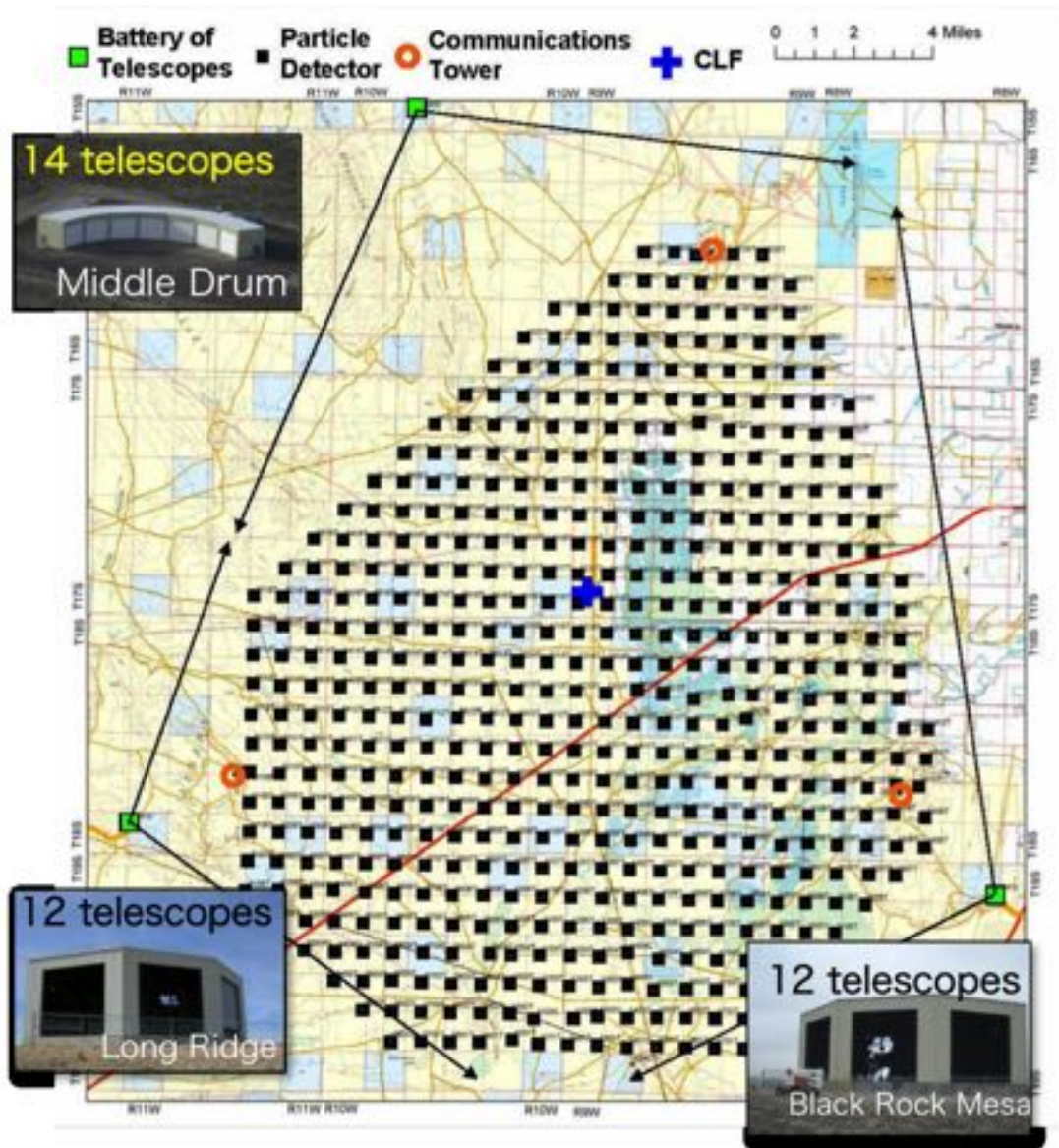


図 2.2: TA 実験における装置の配置図

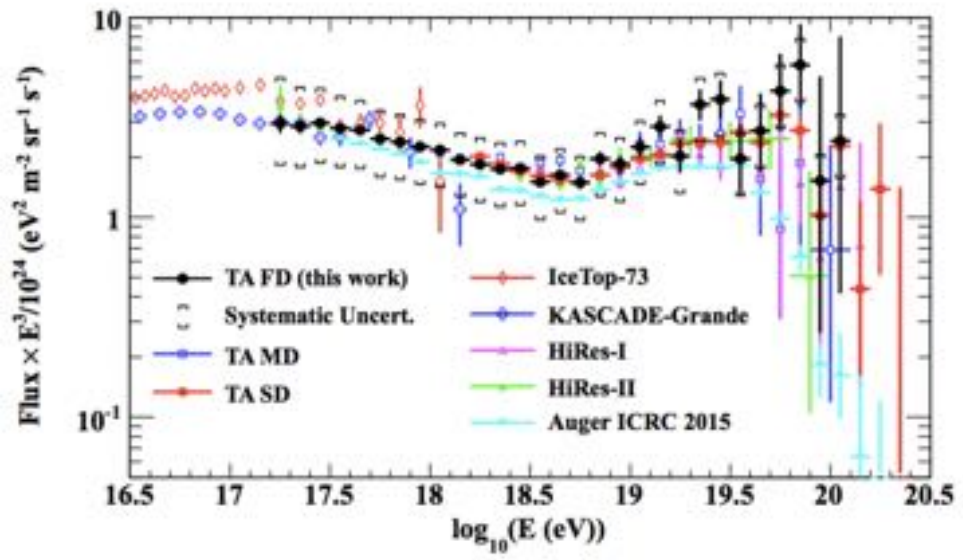


図 2.3: TA 実験といくつかの実験によるエネルギースペクトル [22]。スペクトルの微細構造を見やすくするためにスペクトルに E^3 を掛けている。

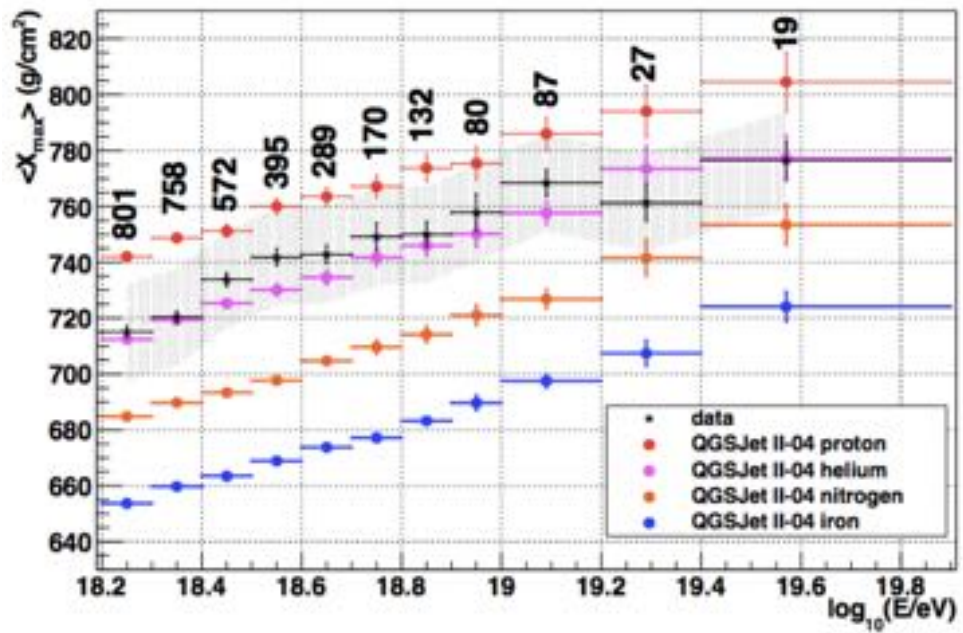


図 2.4: TA 実験による平均 X_{\max} [23]。黒が観測データ、青が陽子と仮定したとき、赤が鉄と仮定したときのシミュレーションの結果。 $10^{18.2}$ eV 以上のエネルギー領域での観測データは、100%陽子であると仮定した時の組成と矛盾しない。

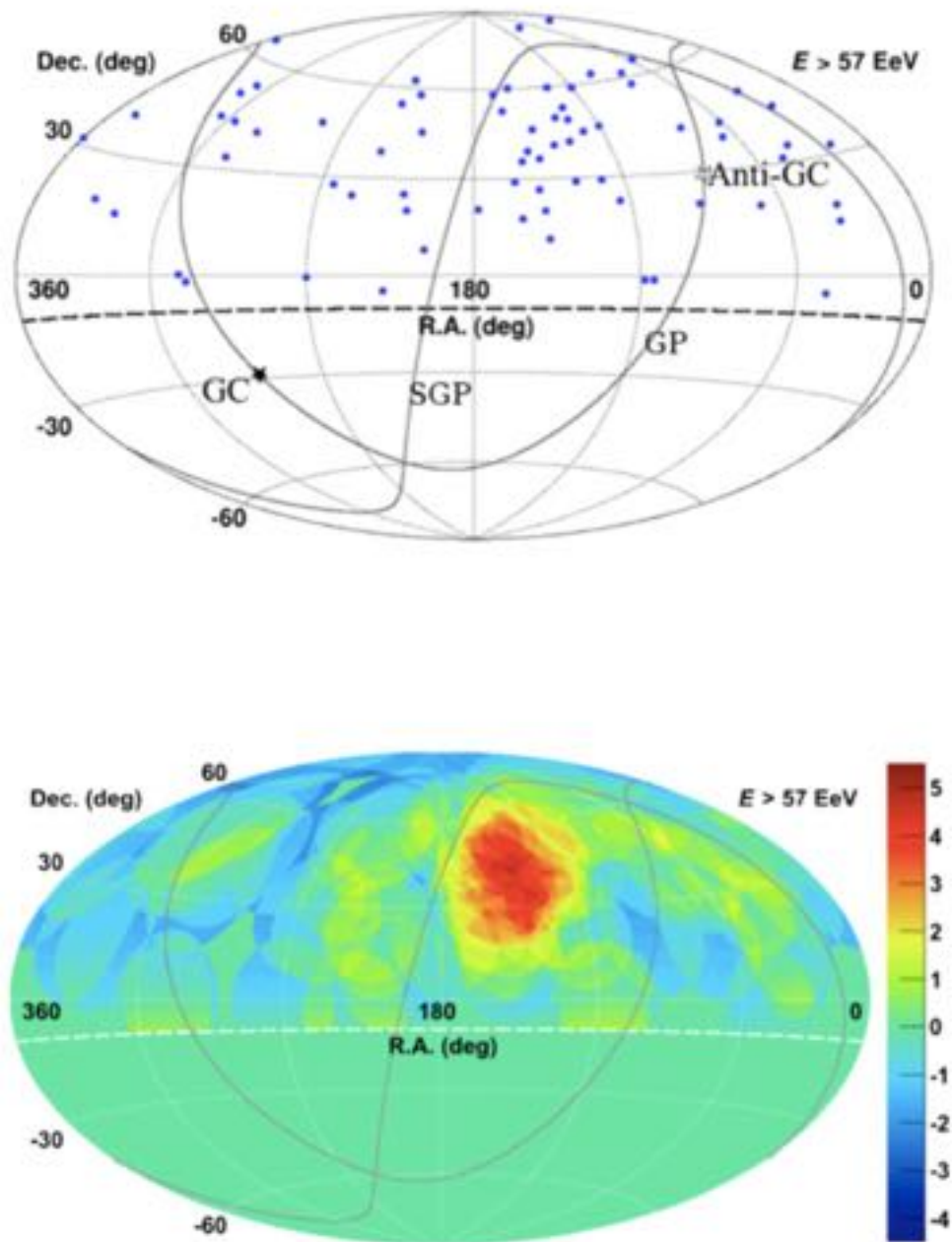


図 2.5: 上図:TA 実験で観測された 57EeV 以上のエネルギーをもつ宇宙線の到来方向。下図:上図の 1 点 1 点について 20 度の円を重ね書きして、その有意度を表したもの [24]。

2.2.1 TA 実験の大気蛍光望遠鏡

TA 実験の FD 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、FD は 3ヶ所のステーションに設置されている。Long Ridge(LR) ステーション、Black Rock Mesa(BRM) ステーション、Middle Drum(MD) ステーションの 3つである。LR、BRM ステーションに設置されている FD は、TA 実験のために新たに設計されたもので、口径 3 m の球面鏡を持つ望遠鏡が 12 台ずつ設置されており、ステーション全体で方位角 108°、仰角 3°-33° の範囲を見る。図 2.6 に Long Ridge(LR) と Black Rock Mesa(BRM) の FD の外観を示す。Middle Drum(MD) ステーションに設置されている 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]。



図 2.6: LR、BR ステーションの大気蛍光望遠鏡

2.2.2 TA 実験の地表検出器

TA 実験の SD アレイは間隔 1.2 km の碁盤目上に並べられた 507 台の SD からなり、700 km² の検出面積を持つ。TA の SD アレイは 3 領域の部分アレイから構成されており、各中央データ収集塔はそれぞれ SKCT(Smelter Knoll Communication Tower)、BRCT(Black Rock Mesa Communication Tower)、LRCT(Long Ridge Communication Tower) と呼ばれる。各領域ごとに 1 つの中央デー

タ収集塔と無線 LAN 通信で接続されている。SD は基本的に TALE 実験のものと同じであるので、2.5 節で詳しく説明する。

2.3 TALE 実験の装置の外観

TALE 実験は、TA 実験に隣接して、TA-FD より高仰角方向をみる大気蛍光望遠鏡と、より高い設置密度の地表検出アレイを追加することで、観測のしきい値エネルギーを $10^{16.5}$ eV まで下げ、エネルギースペクトルと質量組成をハイブリッド観測により測定する実験である。TALE 実験の配置図を図 2.7 に示す。

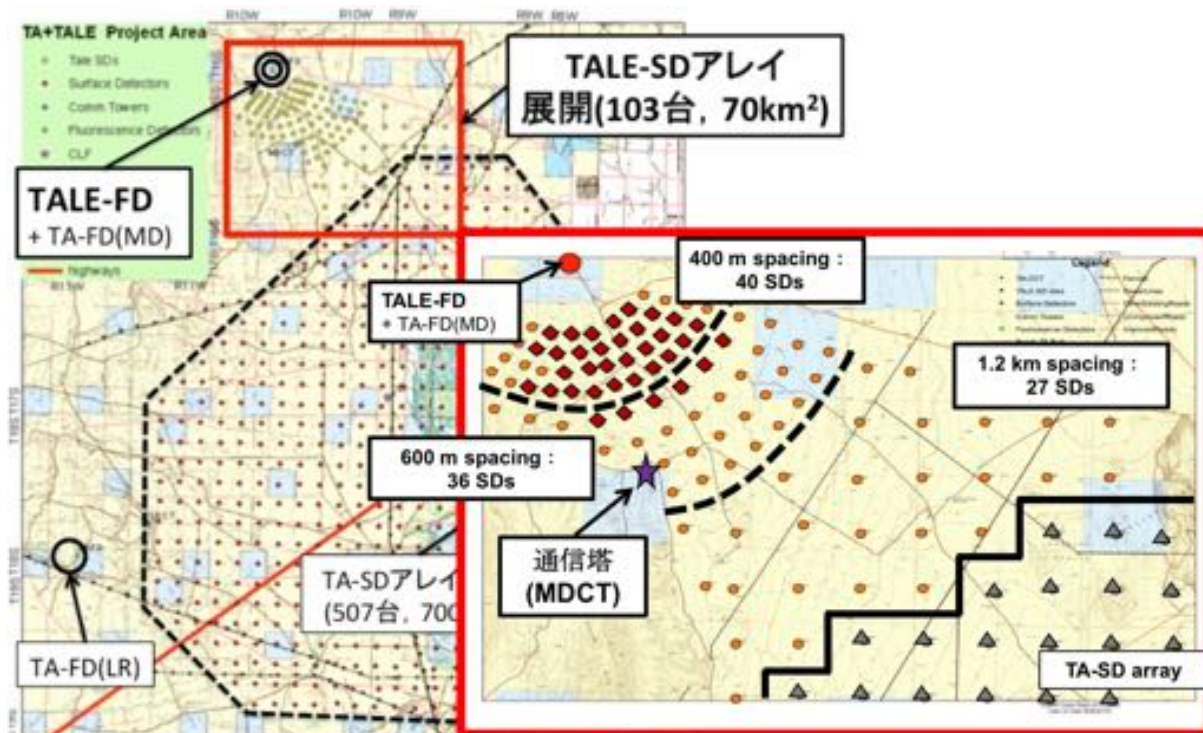


図 2.7: TALE 実験の装置の配置図。赤四角は 2013 年に設置された SD で橙丸は 2017 年に設置された SD である。星は TALE 実験の中央データ収集塔である MDCT(Middle Drum Communication Tower) である。

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-FD の視野のさらに上、仰角 31° - 59° を見る。これにより、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。TALE 実験 FD ステーションには 10 台の FD が 2012 年に設置され、2013 年から稼働している。

TALE 実験 FD ステーションの前には、103 台の SD からなる高密度空気シャワーアレイを展開している。2013 年に SD35 台が設置されており、2017 年 2 月に残りの SD を全て設置し、TALE 実験 SD アレイが完成した。

一次エネルギーが 10^{16} eV 台の空気シャワーに対して、TALE 実験 FD によって検出可能なコア距離はステーションからほぼ半径 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、SD を密に配置する。そこで、

TALE 実験 FD ステーションに最も近い部分には、SD を 40 台、400 m 間隔で並べ、 3×10^{16} eV 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、SD36 台を 600 m 間隔で並べ、 10^{17} eV 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、27 台の SD を 1.2 km 間隔で配置する。

2.4 TALE 実験の大気蛍光望遠鏡

TALE 実験 FD ステーションは図 2.8 のように MD ステーションに隣接して設置されている。TALE 実験 FD ステーションに設置している望遠鏡とエレクトロニクスは HiRes 実験で使われた装置を再調整したものである。図 2.9 のように望遠鏡の主鏡は MD ステーションで使用しているものと同様のもの、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 m^2 のクロージャー型の合成球面鏡である。望遠鏡 1 台の視野は方位角方向、仰角方向ともに 14° である。TALE 実験の FD ステーションは 30° - 44° の視野を向く望遠鏡 5 台と、 44° - 57° の視野を向く望遠鏡 5 台からなり、全体では方位角 114° 、仰角 30° - 57° をカバーしている。

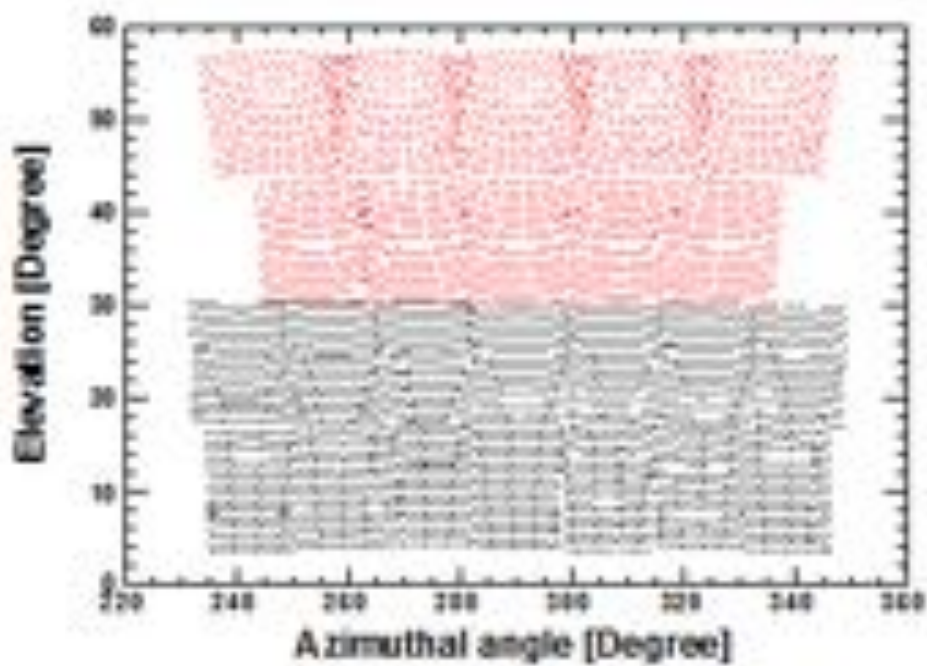


図 2.8: 上図:MD ステーションと TALE ステーション 下図:下の黒い部分が MD の視野、上の赤い部分が TALE の視野である。



図 2.9: TALE 実験 FD ステーションの大気蛍光望遠鏡

2.5 TALE 実験の空気シャワーアレイとトリガー DAQ サイクル

TALE 実験 SD アレイに最初に設置された 35 台の SD は、TA 実験で使用している SD と同じものである。しかし 2017 年 2 月に TALE 実験 SD アレイに追加で設置された SD は、PMT および波長変換ファバーの張り方が TA 実験用 SD と異なる。SD エレクトロニクスについても、無線 LAN モジュールが TA 実験用 SD エレクトロニクスと異なる。さらに、SD エレクトロニクスの無線 LAN モジュールを変更することによって、SD エレクトロニクスのファームウェアの書き換えが必要になり、また、中央データ収集塔のセットアップも大きく変更することになった。

この章では、TALE 実験 SD アレイの概要と、データ収集方法であるトリガー DAQ サイクルについて説明する。なお、無線 LAN モジュールの変更によって生じる諸々の変更点はその都度言及するが、詳しくは 3 章および 4 章で説明する。

2.5.1 TALE 実験の地表検出器

TALE 実験で最初に設置された 35 台の SD は、TA 実験で使用している SD と同じものである。図 2.10 はこの SD の外観である。SD の粒子検出部分には、1.2 cm 厚、2.0 m×1.5 m のプラスチックシンチレータ (CI 工業製 CIMS-G2) を 2 層重ねたものが用いられている。上下層のシンチレータか



図 2.10: 現在設置されている TALE 実験 SD。茶色の屋根の下にシンチレータボックスが格納されている。



図 2.11: ソーラーパネルの裏の箱に SD エレクトロニクスとバッテリーが格納されている。

らの信号のコインシデンスをとることで、環境ガンマ線によるノイズを取り除き、二次宇宙線荷電粒子からの信号を区別する。なお、1層のシンチレータは8枚のシンチレータパネルで構成されている。荷電粒子が入射するとシンチレータは発光する。発生した光は、各層ごとに104本の波長変換ファイバー (Kuraray 製 Y-11) を通じて光電子増倍管 (Electron-tubes 製 9124SA、PhotoMultiplier Tube、以下 PMT) に導かれる。上記のシンチレータ、ファイバー、PMT は、シートで遮光した上で、厚さ 1.2 mm のステンレス製の箱に収納されている。これをシンチレータボックスと呼んでいる。図 2.12 に、現在設置している 35 台の SD のシンチレータボックスの構成図を示す。

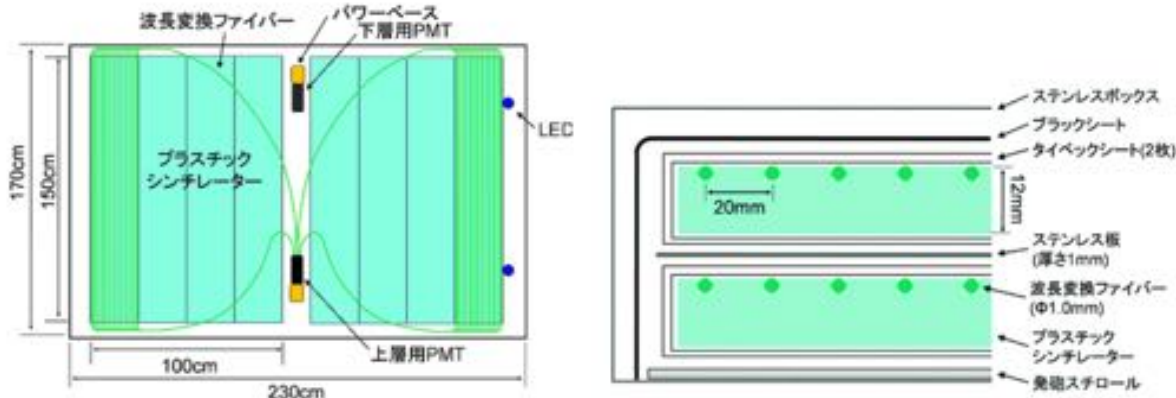


図 2.12: TA 実験用 SD と同じタイプ (旧型) の 35 台の SD のシンチレータボックスの構成図。(左) シンチレータボックスの内部構造 (右) シンチレータボックスの断面図

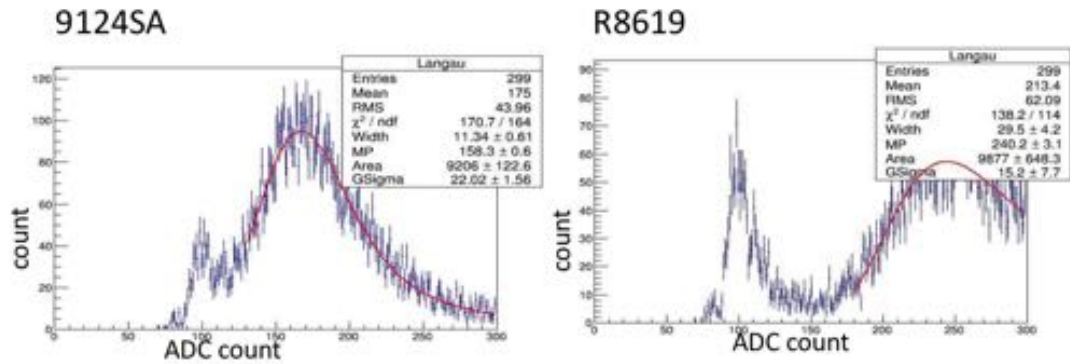
なお、2017 年に設置された SD はシンチレータボックス内部の構成が異なる。PMT には、量子効率、感度の一様性、線型性が良く、さらに PMT ごとのばらつきが小さい浜松ホトニクス製 R8619 が使用されている。図 2.13 に旧型 SD 用 PMT と新型 SD 用 PMT の 1 MIP ピークの比較を示す。PMT 単体でみると 9124SA よりも R8619 の方が量子効率が 2 倍ほど良いことがわかる。また PMT を固定するクッキーを透明なものから白いものに変更することで $10.6 \pm 0.6\%$ 光量を上げた。そして、図 2.14 のように、コスト削減のためにファイバーのシンチレータへの張り方を変更しており、旧型では 2cm 間隔で張っていたが、新型は 4cm 間隔で張った。これにより、旧型に比べファイバーを 67% 削減することができた。

これらの変更の結果、旧型 SD で取得した 1 MIP ピークは 23 ± 5 p.e. なのに対し、新型 SD で取得した 1 MIP ピークは 23 ± 2 p.e. となった。よって新型 SD は旧型 SD と同程度のパフォーマンスを実現できていることがわかる。[26]

PMT の出力はフラッシュ ADC (AD9235BRU-65) により、上下層のチャンネルごとに、12 bit の分解能、50 MHz のサンプリング周波数でデジタル化して記録している。SD のシステムクロックのタイミングと周期は、各 SD に搭載された GPS 受信機 (Motorola M12+) によって、GPS の PPS と常時比較されており、異なる SD 間でのタイミングのずれは約 14 ns 以内に抑えられている。

電力源として 120W のソーラーパネル (京セラ社製 KC120J) とバッテリー (DYNASTY 社製 DCS-100L) を使用しており、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 時間連続に自立稼働している。図 2.11 のように、ソーラーパネルの裏側にはステンレスボックスが置かれており、その中に SD を制御する SD エレクトロニクスが入っている。

TALE 実験では TA 実験と同じ SD エレクトロニクスを使用する予定をしていたが、SD エレクトロニクスの構成要素のうち無線 LAN モジュールの生産がすでに終了しており、入手不可能で



	1mipピーク (ペDESTALを含む)	ペDESTAL	1mipピーク
9124SA	158.3	80.4	77.9 (≈ 20 p.e.)
R8619	240.2	80.0	159.8 (≈ 40 p.e.)

図 2.13: 各 PMT を同じゲインに揃えて 1mip を測定し、相対比較したもの。[26]

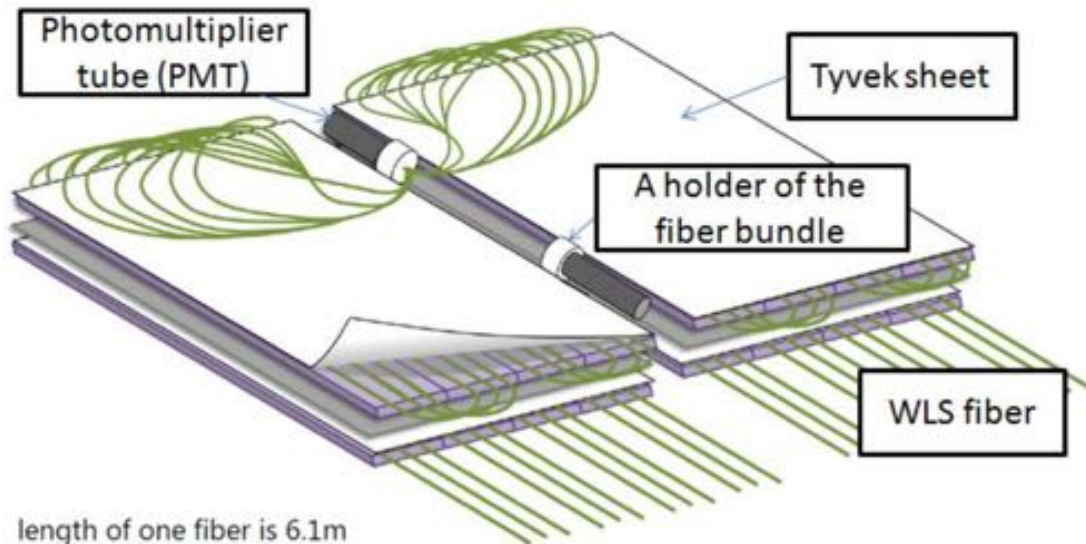


図 2.14: TALE 実験用に改良された (新型)SD のファイバーの取り回し。画像は 2 枚のシンチレータに 3 本のファイバーを張っているが、実際は 2 枚のシンチレータに 7 本のファイバーを張っている。[26]

あったことから、SD エレクトロニクスを増産するためには、新しい別の無線 LAN モジュールへの交換が必要になった。それに伴い SD エレクトロニクスのファームウェアの最適化も必要になった。このように、無線 LAN モジュールを交換し、ファームウェアを最適化した SD エレクトロニクスを今後「新型 SD エレクトロニクス」と呼ぶことにする。この新型 SD エレクトロニクスの詳しい説明については 3 章で述べる。

2.5.2 SD エレクトロニクス

SD エレクトロニクスの電子回路は、主に以下の 6 つの要素で構成される。

- PMT 波形のデジタル化のための FADC。12 bit の分解能、50 MHz サンプリングのものが上下層のシンチレータ用に 2 チャンネルあるため、処理される情報量は 1.2 Gbps である。
- 高速信号処理のための FPGA(Xilinx 社製 XC3S1000)。ゲート数は 100 万。主に PMT 波形の処理と保存、PMT 印加電圧コントロール、シリアルインターフェースコントロール、無線 LAN 通信の初段処理、GPS 通信の初段処理を行なっている。
- 全体機能統括用 CPLD(Xilinx 社製 XC2C256)。主に CPU のブートコントロール、FPGA ブートコントロール、電源コントロールを行なっている。
- 複雑な処理を行うための CPU(ルネサステクノロジ社製 SH4 マイコン SH7750S)。動作周波数は 167 MHz である。大半の情報処理はこれによって行われる。
- 位置情報、絶対時間情報取得のための GPS(Motorola 社製 M12+)。
- 無線 LAN モジュール。

図 2.15 に SD エレクトロニクスの外観写真とブロック図を示す。

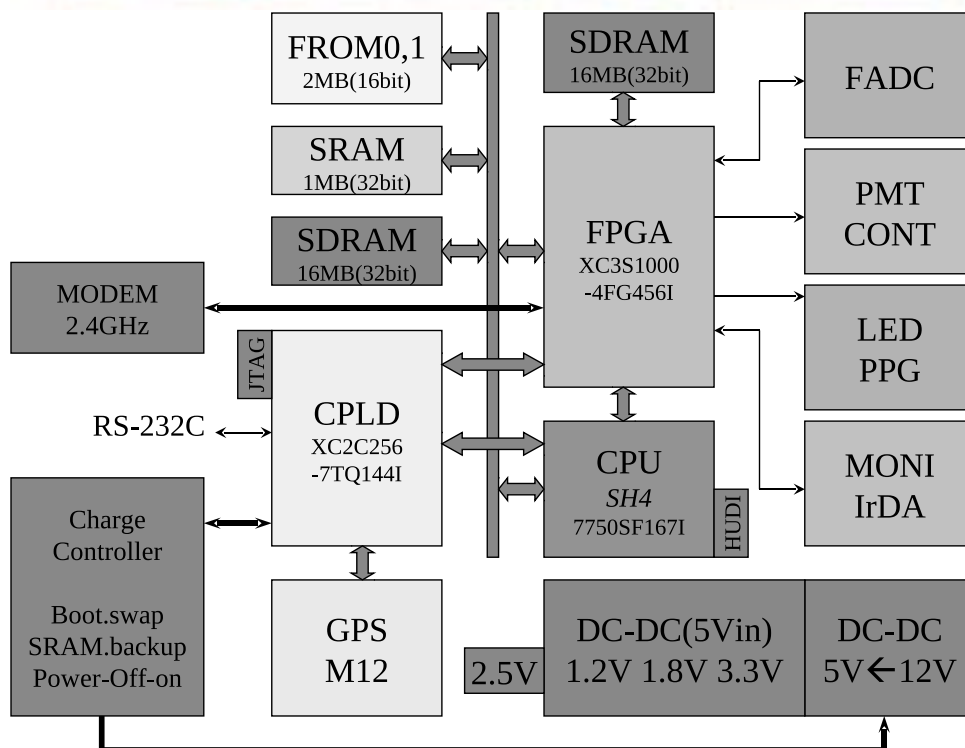
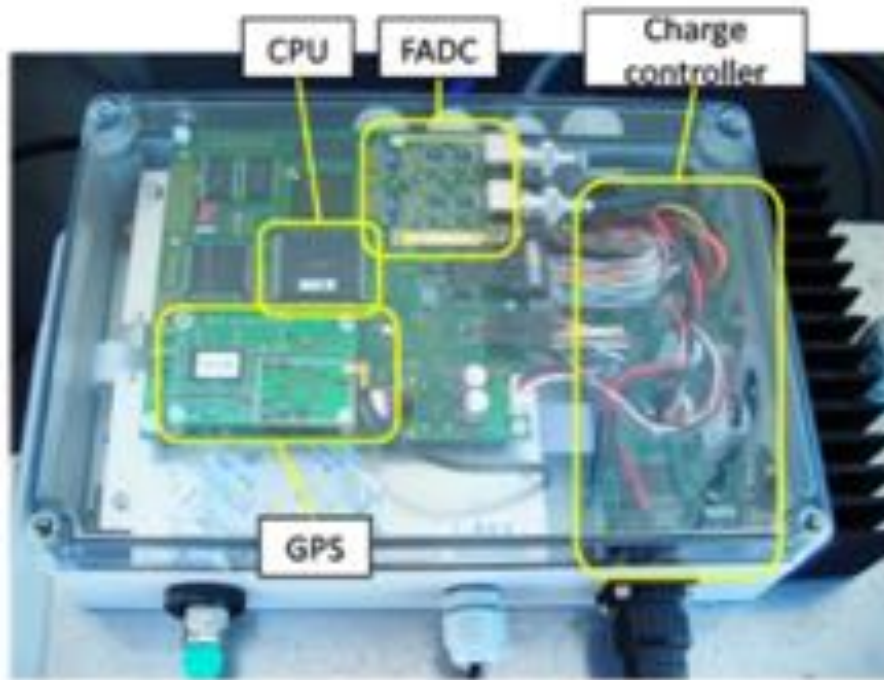


図 2.15: (上)SD エレクトロニクスの外観。(下)SD エレクトロニクスのブロック図。

2.5.3 中央データ収集塔 (タワー) の基本構成

図 2.16 は中央データ収集塔の外観である。なお、これより以後は中央データ収集塔を「タワー」と呼ぶことにする。2013 年に設置された旧型 SD による運用時は SD と通信するための無指向性

アンテナ、タワーエレクトロニクス (SD エレクトロニクスと同型だがファームウェアのみが異なる)、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 製 Canopy PTP100)、発電用太陽電池パネルとバッテリーから「タワー」が構成されていた。タワーにはタワーのふもとから先まで手動による昇降が可能な箱が取り付けられており、その箱の上に無指向性アンテナ、箱の中にタワーエレクトロニクスが納められている (図 2.17)。太陽電池パネルの裏にも大きな箱があり、その中に DAQ 用の産業用 PC やバッテリー等の機器が格納されている。DAQ 用の産業用 PC でタワーエレクトロニクスを制御し、タワーエレクトロニクスは無指向性アンテナを使用してアレイ内の SD と通信する。なお、2017 年から新型 SD エレクトロニクスを使用するにあたって、タワーのセットアップも変更された。これに関しては 4 章で詳しく説明する。



図 2.16: TALE 実験の SD アレイのための中央データ収集塔

2.5.4 トリガー DAQ サイクル

SD はある一定エネルギー以上の信号を検出するたびに 2 種類のトリガーを発行する。これらはレベル 0 トリガーとレベル 1 トリガーと呼ばれているものである。なお、各トリガーの詳しい説明については次の 2.5.5 節で述べる。そして SD は 1 秒間に発生した全てのレベル 1 トリガーのタイミング情報をまとめたレベル 1 トリガーテーブルを每秒生成する。タワーは全 SD に対してレベル 1 トリガーテーブルの送信を要求し、SD はレベル 1 トリガーテーブルをタワーに送信する。タワーはこの処理を 1 秒以内にアレイ内の全 SD に対して順々に行う。そして全 SD からレベル 1 トリガーテーブルを受信したタワーは、これらを基にレベル 2 トリガー (空気シャワーイベントトリガー) 判定を行う。レベル 2 トリガーが発行されるとタワーは次の秒で全 SD に対して波形探査を命令し、その次の秒で各 SD は波形データをタワーに送信する。このような空気シャワーデー



図 2.17: 中央データ収集塔に設置されている、タワーエレクトロニクス

タ収集サイクルをトリガー DAQ サイクルと呼んでおり、SD アレイは常にこのトリガー DAQ サイクルを行っている。このトリガー DAQ サイクルを時系列にそって書き下すと以下のようなになる。なお、ここでは1つ1つの箇条書きの各項目が1秒に行われる処理である。

1. SD は PMT の波形信号処理をし、レベル1トリガーの判定を行う。レベル1トリガーが発行されるとレベル1トリガーテーブルを生成あるいは既にあるテーブルに情報を追加する。
2. SD はタワーの要求に従ってレベル1トリガーテーブルをタワーに送信する。
3. 全 SD からレベル1トリガーテーブルを受けたタワーはレベル2トリガーの判定を行う。レベル2トリガーが発行されると、タワーは全 SD へレベル2トリガーを送信する。SD はタワーからのレベル2トリガーを受けると、レベル2トリガーに対応する波形を探索する。
4. SD は波形探索結果をタワーへ送信する。探索結果を受けたタワーは SD に波形送信命令を出し、SD は波形をタワーに対して送出する。
5. ただし、波形送信が1秒で終わらなかった場合は、SD はタワーに向かって波形送信が終わるまで1秒毎に波形の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。

また SD はモニターデータも生成しており、レベル1トリガーテーブルをタワーに送信する際にこれも共に送信している。モニターデータについては後に詳しく説明する。図 2.18 にトリガー DAQ サイクル中のタワーの処理と SD の処理の概略をそれぞれ示す。

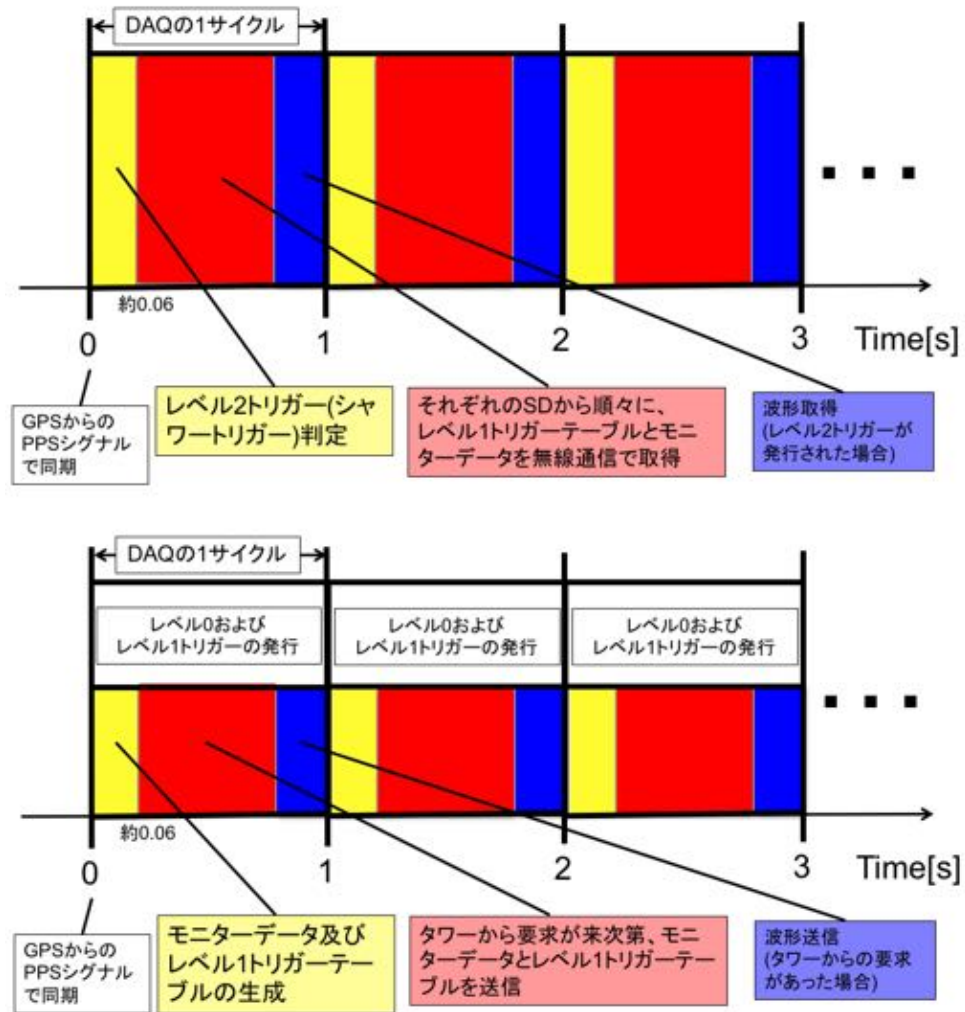


図 2.18: トリガー DAQ サイクルの概略図。上:タワーの処理、下:SD の処理

2.5.5 トリガー DAQ サイクルにおける各種トリガー

レベル0トリガー

物質中での粒子のエネルギー損失量には下限が存在する。このときの粒子を最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle: MIP) と呼ぶ。図 2.19 に物質中での粒子のエネルギー損失を示す [27]。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ので、これらを平均した形での 1 MIP を測定することで SD を較正することが出来る。また、1 個のミューオンによるエネルギー損失 (=1 MIP) は一定であるため、各 SD の 1 MIP 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ずっとエネルギーが大きいため、上下層のシンチレータを貫通する。よって、上下層のコインシデンスをとることでシャワー粒子に対するトリガーとすることができる。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トリガーは波形積分時間 8 タイムスライス (=160 ns)

で、しきい値は 0.3 MIP に相当する 15 ADC 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、レベル 0 トリガーの前 32 タイムスライス (幅 640 ns) から後ろ 96 タイムスライス (幅 1920 ns) の計 $2.56 \mu\text{s}$ で、継続時間の長い信号は単に連続した複数の波形として保存される。これは無線 LAN を通じたデータ転送の際のケットサイズを大きくしすぎないためである。

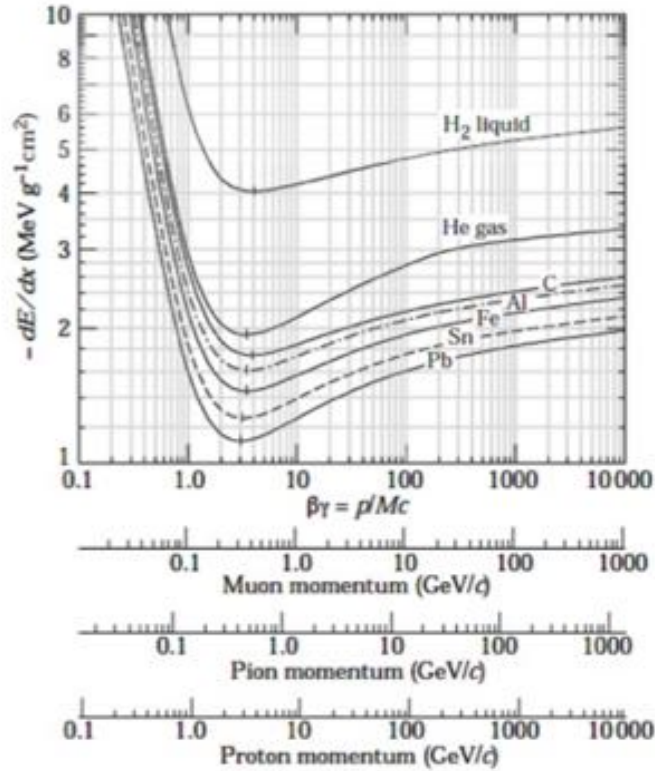


図 2.19: さまざまな高エネルギー粒子のさまざまな物質中でのエネルギー損失 [27]

データバッファリングはすべて FPGA に実装された論理回路によって行われる。以下にデータバッファリングの手順を示す。

1. 8 タイムスライス分 (幅 160 ns) の FADC 積算値の計算を、8 タイムスライス (幅 160 ns) ずつ移動させながら行い、GPS の 1 PPS 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 160 ns) の FADC 積算値を計算し、1 タイムスライス (幅 20 ns) ずつ移動させながらこの計算を繰り返す (移動和)、移動和の値からペ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 (0.3 MIP 相当) よりも大きければ、レベル 0 トリガーを発行する。このトリガーから 1280 ns 以内に起こったレベル 0 トリガーは全て無効化される。
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。トリガーの前 640 ns からトリガーの後ろ 1920 ns までの波形が保存される。トリガーの後ろ 1280 ns から 2560 ns の間に 2 回目のトリガーがかかった場合、波形の重複を防ぐため 2 回目のトリガータイミングは、1 回目のトリガータイミングの 2560 ns 後まで遅らされる。さらに波形

記録専用の SDRAM へは、波形とトリガータイミング (クロック数) の転送と同時に、波形の積分値、波形の最大値、1 PPS 間のクロック数、波形番号を保存する。これらの情報は 10 ms 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 トリガーは、レベル 0 トリガータブルを基にして発行される。レベル 0 トリガーがかかった波形を、波形の記録長である 2560ns のゲート幅で積分しペデスタル差し引き後、これが 150 カウント (=3 MIP) より大きいときに発行される。このレベル 1 トリガーの発行は各 SD の CPU で行われるもので、以下にその手順を示す。

1. GPS の 1 PPS と同時に CPU に割り込みがかかる。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 CPU に読み込む。
2. DMA 転送中であれば、それが終了するまで待った後にレベル 0 トリガーの処理を開始する。処理の内訳としては、クロック数から μs 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がある。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にクロック数を μs に変換している。そして波形の積分値からペデスタルレベルを差し引いた値がスレッシュホールド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 トリガーが発行されるとレベル 1 トリガータブルに新しいエントリーを追加する。レベル 1 トリガータブルの一つのエントリーは、 μs (20 bit) と波形の積分値の上下層の平均 (4 bit) を組み合わせた 3 Byte のデータである。

各 SD は 1 秒間のレベル 1 トリガーを集めたレベル 1 トリガータブルを毎秒タワーに送信する。

レベル 2 トリガー

タワーは、各 SD から送られてくるレベル 1 トリガータブルを基に、レベル 2 トリガー判定を行う。このレベル 2 トリガーは空気シャワー事象かどうかの判定である。8 μs の時間内で隣接 3 台以上の SD がレベル 1 トリガーを発行したことがわかったとき、タワーはレベル 2 トリガーを発行する。レベル 2 トリガーが発行されるとその時刻 (レベル 2 トリガーの判定に使用された全ての 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) が DAQ リストに登録される。

以下に、レベル 2 トリガー判定の手順を示す。

1. タワーはレベル 1 トリガータブルを全 SD から取得する。これと同時にモニターデータ (後述) もタワーに集められている。
2. タワーでは、GPS の 1 PPS と同時に CPU に割り込みがかかる。この後、レベル 1 トリガータブルの μs (20 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。1 PPS と同期させて処理を行う理由は、全 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. タワーは、アレイ全体のトリガーテーブルを $8\mu\text{s}$ のゲート幅 (=同期したとみなす最大の時間差) で走査し、同期したレベル1トリガーが3台以上のSDで見つかった場合は隣接条件を満たすかどうかを確認する。隣接するSDが3台以上という条件を満たしていれば、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、タワーはレベル2トリガー時刻から $\pm 64\mu\text{s}$ の範囲のレベル0トリガーテーブルをSDから収集する。タワーは毎秒、1秒間で全てのSDのモニターデータ及びレベル1トリガーテーブル収集を行うが、レベル2トリガーがあれば、全SDからのレベル1トリガー収集が終わり次第、この1秒の残った時間で、このレベル0トリガーテーブルを集める。また、波形は128サンプル×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。

2.5.6 モニターデータとモニタリングシステム

それぞれのSDは、自らの動作状況を表すモニターデータを生成し、トリガーDAQサイクル中に、タワーに送信している。これは、SDの動作状況を知るため、また、取得したデータのキャリブレーションのために用いられる。モニターデータ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。収集時間間隔が1秒のものは合計8Byteあり、毎秒タワーに送信している。一方、収集時間間隔が1分のもの、10分のは、合計で9kByte程度あり、10分間分をまとめたもの(収集時間間隔が1分のものなら10個、10分のものなら1個)を1セットとし、トリガーDAQサイクルに負荷をかけないために、この1セットを600分割して、毎秒16Byteずつ10分間かけて、SDはタワーに送信する。これを「分割モニターデータ」と呼ぶことにする。

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、レベル1トリガーテーブルは $3N$ Byteになる。したがって、トリガーDAQサイクルにおいてそれぞれのSDは、ヘッダー情報(16Byte)、収集時間間隔1秒のモニターデータ(8Byte)、分割モニターデータ(16Byte)、レベル1トリガーテーブル($3N$ Byte)、レベル1トリガーテーブルのチェックサム(1Byte)で合計 $(16+8+16+1+3N)$ Byte をタワーに向かって毎秒送信している。

以下に、モニターデータの詳細を示す。

● 収集時間間隔1秒の情報

- 1PPS間のクロック数(4Byte)。GPS及びクロックの安定性の確認に用いる。25MHzのクロックを用いているので、この値はおよそ25MHz辺りで安定していることが望ましい。
- GPSタイムスタンプ(2Byte)。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。時間情報の内、分と秒の情報を0から599までの数字に変換したのになっており、例えば5分10秒なら310、7分30秒なら450になる。
- レベル1トリガーの数(1Byte)。ホットチャンネル、デッドチャンネルの識別に用いる。
- 波形探査結果(1Byte)。レベル2トリガーが発行されたときにこの情報を使用する。

● 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。

- バッテリーの電流・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。
 - 太陽電池の出力電流・電圧。
 - 検出器のいくつかの場所で測られている温湿度。
- 収集時間間隔 10 分の情報
 - シングルミュオン信号のスペクトル (2048 Byte × 上下 2 層分)。SD のゲイン較正に用いられる。詳しくは後述する。
 - ペDESTAL のヒストグラム (1024 Byte × 上下 2 層分)。SD の較正に用いられる。詳しくは後述する。
 - 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。
 - GPS 衛星が取得している位置情報。

これらのモニターデータを確認し、不具合が生じていればメンテナンスをする。図 2.20 に、取得したモニターデータを元に、モニター用アプリケーションで出力したグラフの一例を示す。

シングルミュオン信号のスペクトル

FPGA 内部ではレベル 0 トリガー毎に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 で、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原因の大半は、シャワーとは関係のないシングルミュオンによるものと考えられるので、このヒストグラム、すなわち「シングルミュオン信号のヒストグラム」が 10 分ごとにタワーに送られる。これは、シングルミュ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。

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。

図 2.21 にモニター情報から得たバックグラウンドミュオンによる信号とペDESTAL のヒストグラムを示す。

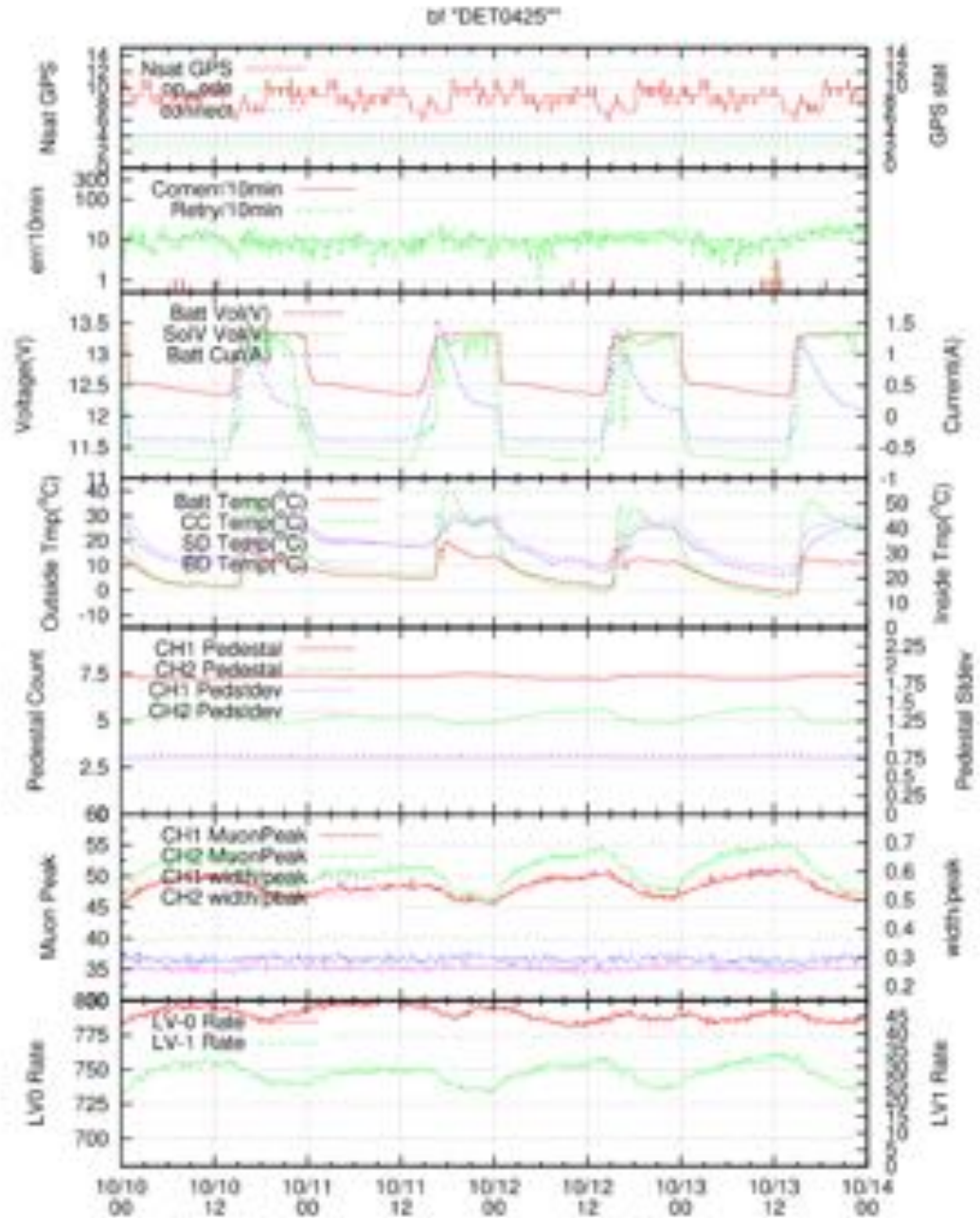


図 2.20: TALE 実験の SD のモニター例 (地表検出器ロジカル ID:0425)。上から、通信できている GPS 衛星数と GPS の状態、10 分間の通信エラー数とリトライ通信数、各種電流・電圧、各種温度、ペDESTAL のヒストグラムから求めたペDESTAL 値とその標準偏差、バックグラウンドミュオン信号のスペクトルから求めた 1 MIP ピークとその幅、トリガーレートを表す。

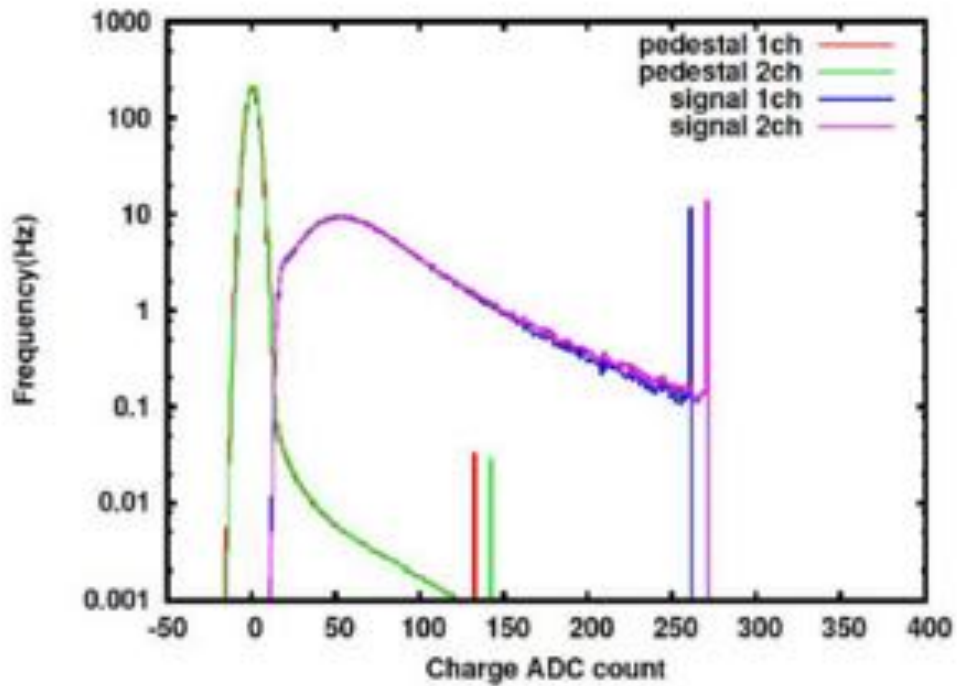


図 2.21: SD のモニター情報から得たバックグラウンドミュオン信号のヒストグラムとペDESTALのヒストグラム。緑色と赤色のヒストグラムはそれぞれ上層と下層のペDESTALのヒストグラムである。また、青色と紫色のヒストグラムはそれぞれ上層と下層のバックグラウンドミュオン信号のヒストグラムである。それぞれのヒストグラムの右側のエントリー (250 ADC カウントの後ろの立ち上がり) は over flow を示す。積分幅は 240 ns。バックグラウンドミュオン信号のヒストグラムではペDESTAL分はすでに引いてある。

第3章 TALE実験SDアレイのための新型SDエレクトロニクス

3.1 新型SDエレクトロニクス

図 3.1 は SD エレクトロニクスのブロック図である。2.5.1 節でも説明したように、TALE 実験 SD アレイを完成させるためには、SD エレクトロニクスの無線 LAN モジュールを新しい別の無線 LAN モジュールに変更した新型 SD エレクトロニクスが必要となった。SD エレクトロニクスは無線 LAN モジュールを用いてデータ通信を行う。データを送受信する際は FPGA でデータ処理をしているため、無線 LAN モジュールの変更に伴って FPGA のファームウェアを書き換えた。

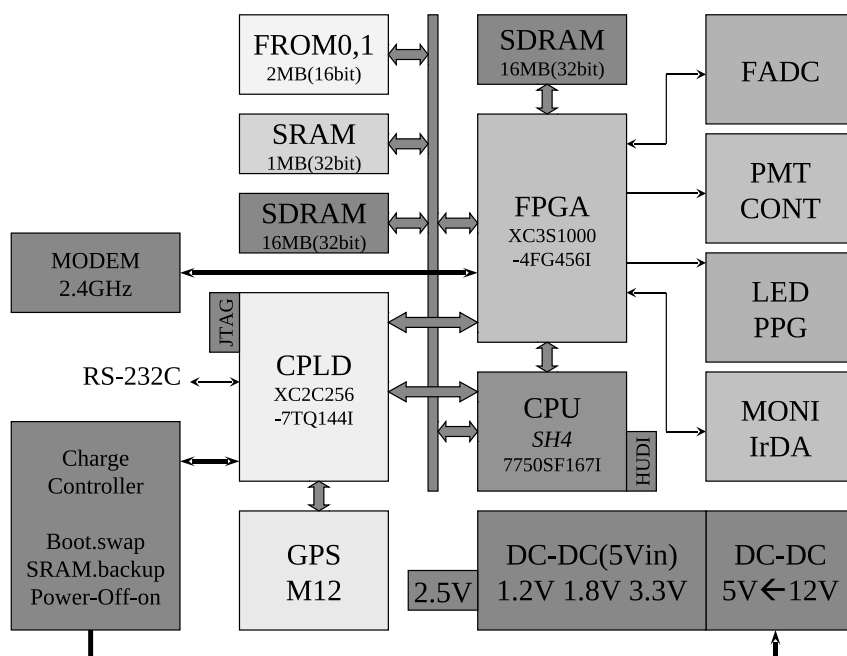


図 3.1: SD エレクトロニクスの概略図

3.2 無線 LAN モジュールの変更

3.2.1 Redpine Signals 社製 RS9110-N-11-02 の性能

TALE 実験用に使用する新しい無線 LAN モジュールとして、送信電力が大きくインターフェイスがシンプルであるという 2 点に注目して Redpine Signals 社製無線 LAN モジュール RS9110-N-11-02 を選定した。これを以下「RS モジュール」と呼ぶことにする。図 3.2 は無線 LAN モジュールの写真で表 3.1 は仕様である。



図 3.2: 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イス	SPI,UART
電源電圧	3.3 V
動作温度	-40 ~ 85°C

表 3.1: Redpine Signals 社製無線 LAN モジュール RS9110-N-11-02 の仕様



図 3.3: RS モジュールのデータユニット。Data の部分には最大で 1000 Byte のデータを入れることができる。

図 3.3 に RS モジュールのデータユニットを示す。Data の部分はユーザーが RS モジュールを制御して書き込むことができる部分で、その他の部分は TCP/IP 通信を実行するために RS モジュールが用意する部分である。

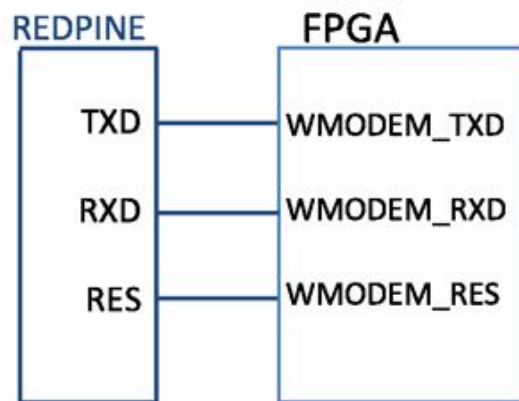


図 3.4: FPGA が RS モジュールを、UART インターフェースで制御するために使用するポート。実際の接続はこれらに 3.3 V の電源供給線と GND 線を足した計 5 本のケーブルで接続している。

RS モジュールはホストインターフェースとして 2 種類のシリアル通信規格 (UART 方式および SPI 方式) のどちらかを選択することが可能である。ここでは、よりシンプルな UART 方式を採用した。SD エレクトロニクスのうち、無線 LAN モジュールを制御する役割を持つのは FPGA である。よって、FPGA と RS モジュールを UART 方式でシリアル通信させることで RS モジュールを制御する。RS モジュールと FPGA とのインターフェースを図 3.4 に示す。RXD は FPGA からデータを受信するポート、TXD 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 8 bit、パリティなし、ストップビットは 2 bit で通信が行われる。なお、RS モジュールは 3.3 V の電源電圧で動作するが、SD エレクトロニクスは 3.3 V を供給できない。このため、SD エレクトロニクスの 5.0 V の出力を三端子レギュレータ (ROHM 製 BA033CC0T) を用いて 3.3 V に降下させ、RS モジュールに電源として供給している。図 3.5 は SD エレクトロニクスの外観、図 3.6 は SD エレクトロニクスに接続した状態の RS モジュールである。

3.2.2 RS9110-N-11-02 の取り扱い方

RS モジュールの起動方法は次のように行う。まず 3.3 V で電源を供給し、その後 RES ポートを High(3.3 V)→Low(0 V)→High(3.3 V) とする。この 2 つの手順で RS モジュールは起動する。



図 3.5: SD エレクトロニクスの上段部。下段部分に RS モジュールを格納している。



図 3.6: SD エレクトロニクスの下段部。RS モジュールを格納している。

UART 仕様の RS モジュールは、デフォルトでは 115,200 bps でシリアル通信を行うが、起動後に、RS モジュールによる自動検出によって以下のようにシリアル通信の速度を変更することができる。ここでの送信、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 3.3 V 供給 (High)。
2. リセット端子を Low にする。
3. リセット端子に再度 3.3 V を供給 (High)。(RS モジュール起動完了)
4. 約 100 ms 待つ。
5. 0x1C を設定したいボーレートで RS モジュールに送信する。
6. 0x55 を受信する。
7. RS モジュールから 0x55 を受信しなかった場合は RS モジュールが 0x55 を送出していなかったと考えられるので、約 200 ms 後に 5 に戻る。
8. 0x55 を RS モジュールに送信する。
9. RS モジュールが送出する起動メッセージを受信する。

RS モジュールは起動完了後 18 秒以内にシリアル通信速度の自動検出を完了しなければ、デフォルト値 (115,200 bps) に設定され起動メッセージを送出する。なお、RS モジュールが送出する起動メッセージは以下のとおりである。

```
WELCOME TO REDPINE SIGNALS
Firmware upgrade (y/n)
Loading...
Loading Done
```

RS モジュールはシリアル通信で FPGA から受け取った UART コマンドに応じた動作をする仕様であるために、FPGA から RS モジュールに対してシリアル通信で、アスキーコードで記述した UART コマンドを送信する必要がある。したがって、起動メッセージ受信後、以下の順の UART コマンドを FPGA から RS モジュールに送信し、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 (自らの IP アドレスの設定)
7. Socket オープンコマンド or TCP リッスンコマンド (接続の確立)
8. Send コマンド (接続を確立した相手に対してのデータ送信)
9. Socket クローズコマンド (ソケットのクローズ)

1 から 6 までが RS モジュール自体の初期化作業、7 から 9 までが実際に相手と通信するときの処理である。コマンドが正しく実行できたら、“OK”、コマンドが失敗した時は“ERROR”を RS モジュールはシリアル通信で FPGA に返す。

各コマンドの詳しい説明を 3.2.3 節で、新型 SD 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 UART コマンドについては 3.3 節で説明する。

3.2.3 UART コマンド

3.2.2 節でも述べたように RS モジュールは UART コマンドによって操作される。RS モジュールに向けて送信する UART コマンドは「at+rsi_」で始まる。この章では各 UART コマンドについて説明する。

Band コマンド

起動メッセージ受信後、まずモジュールの使用する周波数帯を決める以下のコマンドを RS モジュールに送信する。

- at+rsi_band=*band_val*

band_val は 2.4 GHz/5 GHz を表すパラメータである。2.4 GHz 帯を使用する場合は 0、5 GHz 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。TALE 実験では 2.4GHz 帯域を指定するので、0 を入れる。

Init コマンド

次は初期化を行う以下のコマンドを RS モジュールに送信する。

- 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

次は全てのチャンネル、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以下のコマンドを RS モジュールに送信する。

- at+rsi_scan=*chan_num*

chan_num では band コマンドで指定した周波数帯域のうち使用するチャンネル番号を指定する。0 を設定した場合は、すべてのチャンネルをスキャンする。Scan コマンドを RS モジュールに送信すると、それを受けた RS モジュールはその時点において自身が認識できた全 SSID を FPGA に向かって出力する。

Network コマンド

次はRS モジュールのネットワークタイプを指定するための以下のコマンドをRS モジュールに送信する。

- `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) の3種類があり、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 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。なお、使用するアクセスポイントについては4章で詳しく説明する。また *type* と *chan_num* はアドホックモードを指定した場合のみ記述し、インフラストラクチャモードの場合は *net_type* のみで良い。*type* ではアドホックモードの Joiner/Creator を指定する。0 を指定したときは Joiner、1 を指定したときは Creator となる。

Join コマンド

次はネットワークに接続するための以下のコマンドをRS モジュールに送信する。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。オートレートの時は0、1 Mbps の時は1、2 Mbps の時は2、5 Mbps の時は3、11 Mbps の時は4を指定する。*TxPower* では、送信電力を指定する。Low Power(7 dBm) の時は0、Medium power(10 dBm) の時は1、High power(16~17 dBm) 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以下のコマンドをRS モジュールに送信する。

- `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。固定IPを使用する場合は0、DHCP サーバからIPアドレスを受け取る場合は1を指定する。*IP_address* にはRS モジュールに設定するIPアドレスを入れる。DHCP サーバからIPアドレスを受け取る場合は指定の必要がないので0を入れる。*SUBNET*、*GATEWAY* には指定するサブネットマスクおよびゲートウェイアドレスを入れる。DHCP の場合はこれらもDHCPが決めるため、0を入れておけば良い。

TCP リッスンコマンド

このコマンドは RS モジュールをコネクション待ち受け状態にするコマンドである。TALE 実験では SD は自発的に無線通信をせず、常にタワーからのコネクション接続要求を待ち受ける。

- `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 コネクションの接続要請がくるとコネクションが確立される。TALE 実験ではポート番号として 8765 を使用している。

Socket オープンコマンド

TCP/IP 通信は通信機器同士のコネクションを確立し、そのコネクションを通してデータ通信をする。具体的にはコネクション待ち受け状態の機器に対して、他の機器からコネクション接続要求を受信することでコネクションを確立する。このコマンドは他の機器にコネクション接続要求を送信するコマンドである。

- `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。TALE 実験では、コネクション待ち受け状態の SD に対して、タワーからコネクション接続要求をするというシステムになっているので、Socket オープンコマンドは SD エレクトロニクスでは用いない。

Send コマンド

TCP/IP 通信ではコネクションが確立された状態でしかデータ通信ができない。よってデータ送信をする際は、コネクションが確立された後に、以下のコマンドを RS モジュールに送信する。

- `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。TALE 実験ではソケットハンドルは常に 1 を使用する。`sz` には送信するデータのサイズ (Byte 単位) を入れる。UDP ソケットを利用する場合は `Dip` には送信先の IP アドレスを入れ、TCP ソケットを利用する場合は 0 を入れる。UDP ソケットを利用する場合は `Dport` には送信先のポートを入れ、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、RS モジュールは `¥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。

Socket クローズコマンド

このコマンドはコネクションを切断するコマンドである。

- `at+rsi_cls=hn`

`hn` は開いている TCP ソケットハンドルを表す。このコマンドは開いている TCP ソケットを閉じるもので、TCP ソケットを閉じることによって確立されていたコネクションを切断する。TCP/IP 通信では通信している両者のうちの片方がコネクション切断を実行すれば、コネクションが切断されるようになっている。

RSSI 値測定コマンド

RS モジュールは受信電波強度 (RSSI 値:単位 dbm) を測定することができる。

- at+rsi_rssi?

RSSI 値測定コマンドを送信すると、その時点において join している SSID からの受信電波強度を FPGA に向かって 16 進数で出力する。dBm とは、1 mW のときの信号強度を 0 dBm とした相対電力値で、電力 (dBm) = 10log 電力 (mW) で記述される。

割り込み処理

これまでに述べた UART コマンドは、FPGA から RS モジュールに対してシリアル送信するものであるが、RS モジュールから FPGA に向けて送られる割り込み処理が 2 つある。割り込み処理は「AT+RSL」で始まる。

1 つは”AT+RSL_READ=*hn,sz,stream*”である。これは RS モジュールが無線通信でデータを受信した時に FPGA に向けて出力するコマンドである。*hn*には TCP ソケットハンドルが入れられており、サイズは 1 Byte である。*sz*には受信したデータのサイズ (Byte 単位) が入れられており、サイズは 2 Byte 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れられている。

もう 1 つは”AT+RSL_CLOSE*hn*”である。これはコネクションが確立された状態で、通信相手が TCP クローズコマンドのようなコネクション切断処理をしたときに RS モジュールが FPGA に向けて出力するコマンドである。*hn*には TCP ソケットハンドルが入れられており、サイズは 1 Byte である。

3.3 新型 SD エレクトロニクスのためのファームウェアの最適化

3.3.1 FPGA 用ファームウェア

SD エレクトロニクスの無線 LAN モジュールを RS モジュールに交換したことによって、FPGA と無線 LAN モジュール間のポート数が 16 個から 3 個 (TXD、RXD、RES) に変更された。このインターフェースの変更に伴いファームウェアが書き換えられた。FPGA のファームウェアは VHDL 言語で記述されている。

FPGA のファームウェアの内、無線 LAN モジュール関連のことを実装している `u0_wmodem` は `u_wm_if`、`u_wm_send_buf`、`u_wm_recv_buf` という 3 つのコンポーネントからなっている。このうち `u_wm_if` に RS モジュールの設定と無線 LAN 送受信に伴う処理のほとんどが実装されている。`u_wm_send_buf`、`u_wm_recv_buf` はそれぞれ送信データ、受信データのバッファの役割をしている。

`u_wm_if` はコンポーネント宣言のみで処理を行っておらず、`u_wm_init`、`u_wm_recv` という 2 つのコンポーネントからなる。`u_wm_init` は無線 LAN モジュールの設定を行うプロセスと無線 LAN モジュールに向かってデータを送信するプロセス、`u_wm_recv` 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。

ここでは、FPGA のファームウェアの内、RS モジュールの設定と無線 LAN 送受信に伴う処理が実装されている `u_wm_if` というコンポーネントについて説明する。

データ送信

データ送信は 3.2.3 節で述べた Send コマンドによって行われる。CPU からデータ送信要求の信号が来ると、送信データを `u_wm_send_buf` から取得し、以下のようなコマンドを RS モジュールにシリアル送信する。また、送信データの長さも CPU から `u_wm_init` の `tx_leng` という入力ポートに書き込まれるので、それを `leng` に用いる。

- `at+rsi_snd=1,leng,0,0,data`

ここで `leng` は送信データ長、`data` は送信データである。

データ受信

RS モジュールは無線通信相手からデータを受信すると、3.2.3 節で述べたように、“AT+RSI_READ” を FPGA に向かって出力する。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 RS モジュールから FPGA に出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力されると、そのデータのポインタとデータ長のみが CPU に出力される。その後、CPU はポインタとデータ長からそのデータを指定し、そのデータを自身に出力するように FPGA に命令する。FPGA はこの命令を受けて `u_wm_recv_buf` 内のバッファから、データを CPU に送信する。このようにしてデータ受信および、受信したデータの処理が行われる。

RS モジュールの初期設定

RS モジュールは正しく起動すると、受信ポートである RXD を通して FPGA に向かって起動メッセージを送信する。`u_wm_recv` は RXD から入力されるシリアル信号を常に 8 bit 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、RS モジュールの初期化設定作業を行う。

以下に、初期化設定作業において、実際に RS モジュールに対して FPGA がシリアル送信する文字列を送信する順に示す。ここで `SD_ip` は SD の IP 番号の下位 8 bit 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。

1. `at+rsi_band=0`
2. `at+rsi_init`
3. `at+rai_scan=0`
4. `at+rsi_network=INFRASTRUCTURE`
5. `at+rsi_join=TASDTEST01,3,2`
6. `at+rsi_ipconf=0,192.168.123.SD_ip,255.255.255.0,192.168.123.1`
7. `at+rsi_rssi?`
8. `at+rsi_ltcp=8765`

それぞれのコマンドを RS モジュールが受信して、それが正しく実行できると RS モジュールはシリアル通信で FPGA に “OK” と返し、正しく実行されなかった場合は “ERROR” と返す。FPGA は “OK” を受信すると次のコマンドを送信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 RS モジュールをリセットし、再度初期化設定を行う。また、初期化の際に RSSI 値を測定している。SD エレクトロニクスのメンテナンスや動作確認のために PC をシリアル通信で接続している場合には、この RSSI 値を PC の標準出力に出力するようにしている。これによってアクセスポイントの電波強度をオンサイトで SD 毎に確認できるようになっている。

RS モジュールの初期設定後の動作

RS モジュールは初期設定を完了すると、コネクション待ち受け状態になっている。この状態の RS モジュールに対して、他の機器から無線によってコネクション接続要求がくると、通信のためのコネクションが確立され、その後データ通信が可能になる。データ通信後、通信相手からのコネクション切断コマンドを受信すると、RS モジュールは FPGA に対して “AT+RSL_CLOSE” という文字列を出力する。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し、もう一度 TCP リッスンコマンドを実行し、これによってコネクション待ち受け状態になる。この流れで SD エレクトロニクスは他の機器（通常はタワー）と無線通信を繰り返す。

RS モジュールのリポート

RS モジュール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 通信ができなくなる。このような状態に陥るとデータ収集ができなくなってしまう。そこで SD エレクトロニクスのファームウェアには、自動で RS モジュールをリポートさせ、初期設定動作からやり直すプログラムを組み込んでいる。3.2.2 節で述べた方法で RS モジュールをリポートすることができ、RS モジュールが正常に起動すると、もう一度 3.3.1 節で述べた初期設定を実行し、復帰させる。リポート条件は DAQ 中であればタワーとの無線通信が 60 秒間行われなかった場合と設定している。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。また、DAQ 中でなければ 500 秒間タワーとの無線通信が行われない場合と設定している。

タワーとの無線通信の有無はプログラム上では、データ通信の終了時に必ず RS モジュールが FPGA に出力する “AT+RSL_CLOSE” を使用して判断している。具体的には、FPGA が xx 秒間 “AT+RSL_CLOSE” を受信しなかったときには xx 秒間無線通信が行われていないと判断している。

3.4 中央制御計算機 (タワー PC) の導入

RS モジュールは TCP/IP 通信をする際に、1 度通信した相手の情報を記録し、2 度目の通信からはその情報を用いて通信することで時間を短縮する仕様になっている。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際には通信相手の情報を書き換える必要があり、この情報の書き換えに 1 秒近い時間がかかる。したがって、RS モジュールは 5 台以上の相手に対して高速通信ができない。

現在の SD アレイのデータ収集システムでは、タワーエレクトロニクスの無線 LAN モジュールが SD エレクトロニクスの無線 LAN モジュールと通信している。このシステムのまま無線 LAN

モジュールを RS モジュールに更新してしまうと、タワーエレクトロニクスの RS モジュールが 5 台以上の SD と通信することになるので高速通信ができない。TALE 実験のトリガー DAQ サイクルではタワーエレクトロニクスは 1 秒間に 103 台の SD と通信することを求めているので、これでは達成できないと見込まれた。

そこで TALE 実験では、タワーエレクトロニクスを廃止し、中央制御計算機 (タワー PC) を新しく導入することにした。このタワー PC をアクセスポイントに LAN ケーブルで接続し、タワー PC 上のソフトウェアで運用とデータ収集を行うことにした。こうすることで、5 台以上の SD に対する高速通信を実現する。このタワー PC については次の 4 章で詳しく説明する。

第4章 TALE実験SDアレイのためのタワーの新しい構成

3.2.3節で述べたように、新型SDエレクトロニクスを用いるTALE実験SDアレイでは、アクセスポイントを介して無線通信する。さらに3.4節で述べたようにタワーエレクトロニクスを廃止して新しくタワーPCを使用する。図4.1にTALE実験SDアレイのための新しいタワーのセットアップを示す。

この章ではTALE実験SDアレイのために新しくタワーに設置するアクセスポイントとタワーPCについて詳しく説明する。

4.1 アクセスポイント

3.2.3節でも述べるように、TALE実験SDアレイ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ーモードはアクセスポイントを経由してデータ通信を行う通信方式である。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という点から、Cisco社製AIR-AP1572E-Q-K9を選定した。AIR-AP1572E-Q-K9の外観を図4.3に、表4.1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モードが存在する。TALE実験ではAutonomousモードを使用する。モードはアクセスポイントが動作しているIOSというソフトウェアに依存し、出荷時の状態ではLightweightモードのIOSが搭載されているので、AutonomousモードのIOSをアクセスポイントにダウンロードする必要がある。AutonomousモードのIOSはCiscoの公式サイトから取得する。アクセスポイントのコンソールポートとPCをコンソール接続をすることでtelnet接続が可能で、CLIによるコマンド制御ができる。ここでCLIとはCommand Line Interfaceの略で、ユーザに対する情報の表示を文字によって行い全ての操作をキーボードを用いて行うユーザインターフェースのことである。コンソールケーブルとして、Cisco社製72-3383-01 RJ-45 DB-9シリアルケーブルを使用した。アクセスポイントに対するIOSのダウンロードはXMODEMとTFTPの2通りの方法があり、今回はTFTPを使用した。アクセスポイントのEthernetポートとTFTPサーバーのPCをLANケーブルで接続し、CLIによりコマンドを実行することでIOSをダウンロードした。Autonomousモードで起動したアクセスポイントにはPCからブラウザで接続することができ、GUIによる各種設定が可能である(図4.2)。

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た無線通信が可能になる。

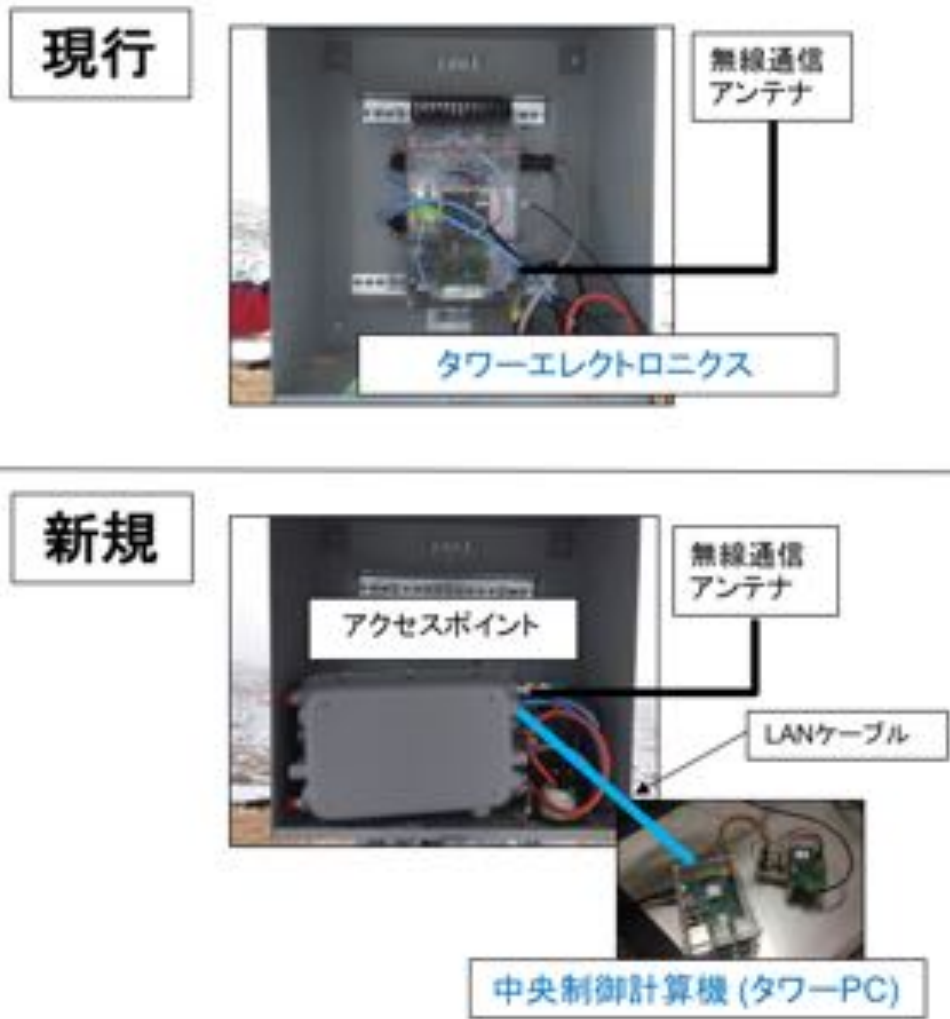


図 4.1: TALE 実験 SD アレイのための新しいタワーのセットアップの概略図。現行 TA 実験 SD アレイのものと比較している。

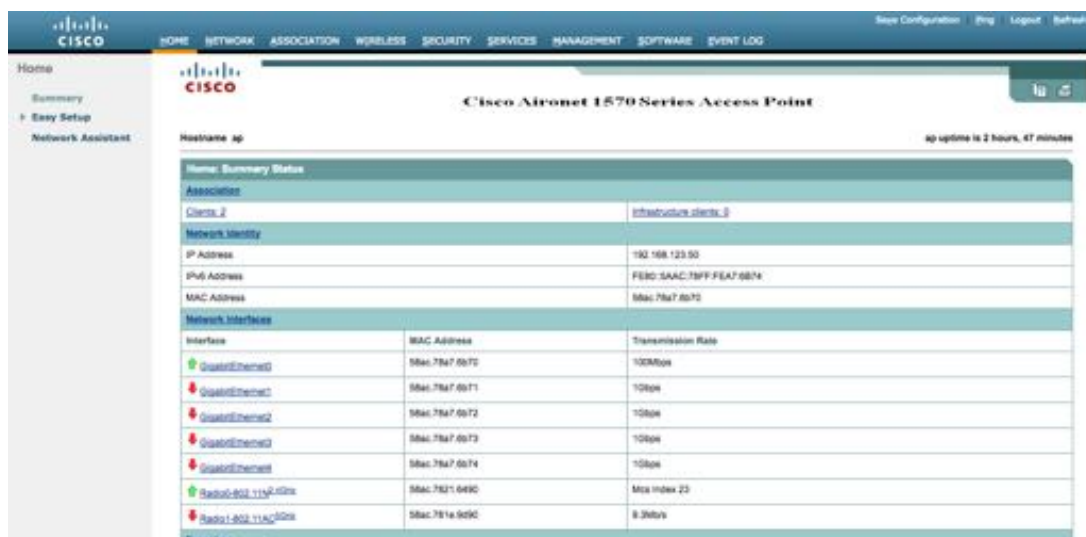


図 4.2: アクセスポイント (AIR-AP1572E-Q-K9) のブラウザによる設定画面。



図 4.3: Cisco 社製 AIR-AP1572E-Q-K9 の外観

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 4.1: AIR-AP1572E-Q-K9 の仕様

4.1.1 アクセスポイントのタワーへの設置

図 4.4 に示すようにアクセスポイントをタワーの昇降可能な箱の中に設置する。現行の TA 実験 SD アレイのタワーには、この箱の中にはホストエレクトロニクスが格納されており、ホストエレクトロニクスの無線 LAN モジュールと、箱の外部にある無指向性アンテナが接続されていた。

設置したアクセスポイントの 2.4 GHz 帯の無線 LAN アンテナコネクタ部分と従来から使用されていた無指向性アンテナを接続する。

アクセスポイントへの給電については 5.2.3 節で説明する。



図 4.4: アクセスポイントはタワーの昇降可能な箱の中に設置される。

4.2 タワー PC

3.4 節で述べたように、新型 SD エレクトロニクスを使用してデータ収集をする場合はタワーに RS モジュールを使用できない。そこでタワーエレクトロニクスを廃止し、代わりにタワー PC を置いて、タワー PC 上のソフトウェアで運用とデータ収集をすることにした。タワー PC として、汎用的な Linux を OS として搭載していること、GPIO ピンを持つこと、容易に入手できることなどから Raspberry Pi 2 model B を選定した。図 4.5 に Raspberry Pi 2 model B の外観、表 4.2 にスペックを示す。このタワー PC を LAN ケーブルでアクセスポイントに接続し、タワー PC 上のソフトウェアで SD と通信させることで、空気シャワーアレイの運用とデータ収集を制御する。



図 4.5: Raspberry Pi 2 model B の外観

タワー PC の OS は Raspberry Pi 用の UbuntuMATE(Linux4.1.18-v7) である。GPIO ピンを使用して GPS モジュールとシリアル通信をするために、Raspberry Pi の GPIO を制御するため

項目	仕様
電源	5 VDC 最大1.8A
寸法 (幅×奥行き)	85.60 mm × 56.5 mm
重量	45g

表 4.2: Raspberry Pi 2 model B の仕様

の C 言語ライブラリである WiringPi がインストールされている。Raspberry Pi は SD カードに OS をインストールして使用する。そのため、SD カードをコピーすることで OS のバックアップを簡単に取ることができるという利点もある。

4.2.1 タワー PC のタワーへの設置

タワー PC はタワーのソーラーパネルの裏の箱の中に設置される (図 4.6)。タワー PC は 5 VDC 電源を必要とするので、バッテリーからの 12 VDC を 5VDC に電圧降下させて使用する。この電源供給の方法については 5.2.3 節で詳しく述べる。タワー PC には、時刻情報と GPS からの 1PPS シグナルを得るために、SD で使われているものと同じ GPS モジュールが取り付けられている。



図 4.6: タワーにおけるソーラーパネル裏の箱の外観

4.2.2 タワー PC を用いての GPS モジュールの制御

タワー PC は、GPIO ピンを用いて GPS モジュールとシリアル接続している。シリアル通信規格は UART で、速度は 9600 bps、データ長 8 bit、パリティなし、スタートビット 1 bit、ストップビット 1 bit に設定されている。

GPS モジュールの電源はタワー PC から供給されている。しかし、GPS モジュールは 3.0 VDC を必要とするのに対し、タワー PC が GPIO ピンを用いて供給できる電圧は 5.0 VDC と 3.3 VDC である。タワー PC の 5.0 VDC 供給の GPIO ピンの方が 3.3 VDC 供給の GPIO ピンよりも供給できる電流が大きいため、図 4.7 と図 4.8 のように 5.0 VDC 供給の GPIO ピンの出力を三端子レギュレータを使って 3.0 VDC まで電圧を降下させて GPS モジュールに給電している。この時、タワー PC が GPS モジュールに供給している電流は 0.05 A 程度である。図 4.9 にタワー PC と GPS モジュールの接続ピンを示す。

GPS モジュールは電源を供給されると、1PPS ピンから 1 Hz の GPS-PPS シグナル (約 200 ms 幅のパルス) を出力する。この GPS-PPS シグナルに同期してタワー PC はトリガー DAQ サイクルを行う。また、タワー PC は以下の方法で GPS モジュールから時刻情報を取得し、自らの時刻情報を 10 秒ごとに更新している。

1. タワー PC から GPS モジュールに対して GPS モジュールのコマンドである “Eq コマンド” をシリアル通信で送信する。
2. その結果 GPS モジュールから時刻情報がシリアル通信で送られてくるようになる。この時刻情報をタワー PC は記録する。
3. タワー PC は 10 秒ごとにこの時刻情報を Linux の date コマンドによって自らの時刻に登録し更新する。

Eq コマンドは GPS モジュールに対するコマンドの一つである。実際にタワー PC が GPS モジュールに送信しているアスキーの文字列は「0x40, 0x40, 0x45, 0x71, 0x01, 0x35, 0x0d, 0x0a」である。また、date コマンドは -set オプションを使用し、「date --set =“2018/1/1 1:1:1”」のようにして実行している。



図 4.7: レギュレータ部分の回路図

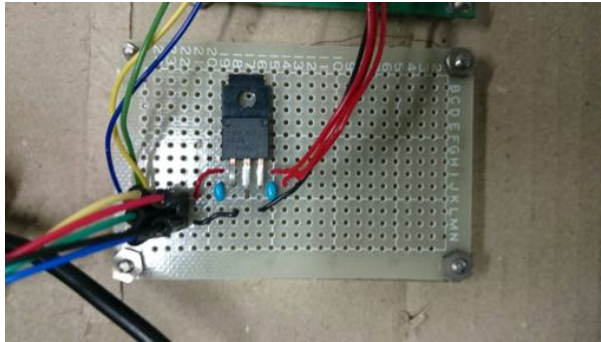


図 4.8: レギュレータ部分の写真

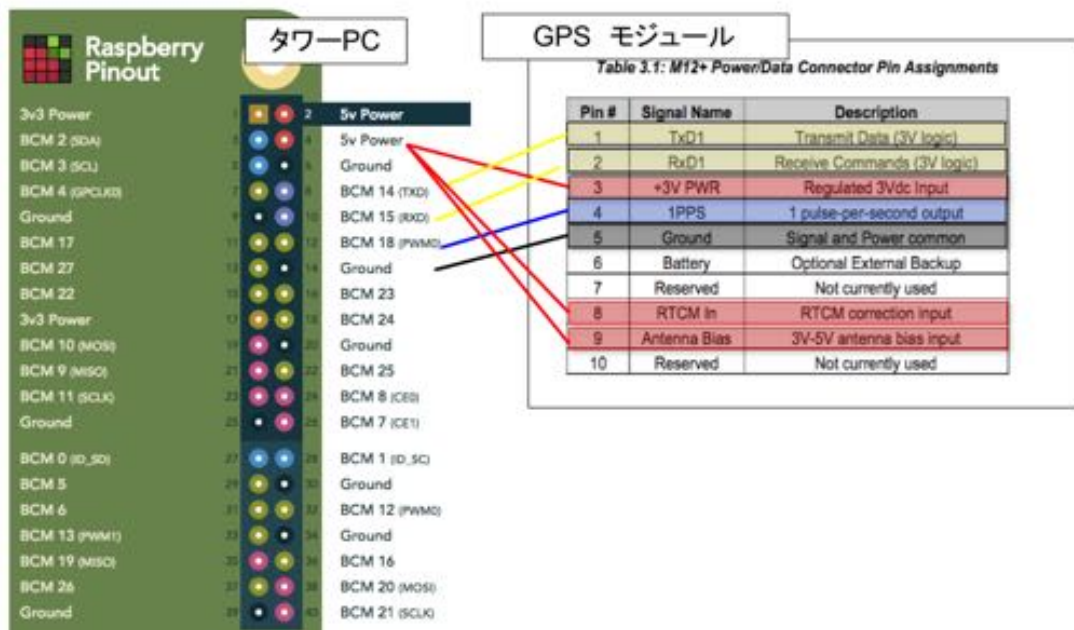


図 4.9: タワー PC と GPS モジュールの接続ピン

4.2.3 タワー PC 上で動かすデータ収集のためのソフトウェア

タワー PC 上で動作するデータ収集のためのソフトウェアを、TA 実験ホストエレクトロニクス上で動いているソフトウェアを参考に、新しく開発した。この新しいソフトウェアは C 言語で記述されており、ここではこのソフトウェアについて説明する。

通信のために使用する主な関数

以下に、通信のために使用する主な関数と、その関数に与えている引数を記す。なお、`errno.h` をインクルードしておく、それぞれの関数は失敗したときに自動的に変数 `errno` にエラーナンバーを格納するようになる。ここでは失敗することが多い `connect` 関数と `select` 関数と `read` 関数について、変数 `errno` に格納されるエラーナンバーの意味する状態についても説明する。

- `socket` 関数 : `int socket(int domain, int type, int protocol);`
 - 使用法 : `dstSocket=socket(AF_INET, SOCK_STREAM, IPPROTO_TCP)`

`socket` 関数は通信のために使用するソケットを作るための関数であり、上のような引数を与えると、TCP/IP 通信のためのソケットを作ることができる。なお、返り値には、そのソケットと 1 対 1 で対応するソケットディスクリプタが入れられる。これ以後このソケットディスクリプタを `dstSocket` と表す。

- `connect` 関数 : `int connect(int sockfd, const struct sockaddr *addr, socklen_t addrlen);`
 - 使用法 : `connect(dstSocket, (struct sockaddr *)&dstAddr, sizeof(dstAddr))`

`connect` 関数はコネクション接続要求を実行する関数で、RS モジュールの `Socket` オープンコマンドに対応する。`dstAddr` には通信したい相手の情報 (IP アドレス) を入れる。SD はコネクション待ち受け状態にあるので、通信したい SD の IP アドレスを引数に指定して実行することで、SD とデータ通信するためのコネクションを確立することができる。

エラーナンバーが 110 の場合、その IP 番号で指定される相手と同じネットワーク下に存在しないことを示す。エラーナンバーが 111 の場合、その IP 番号で指定される相手と同じネットワーク下に存在はするが、コネクション待ち受け状態にはないことを示す。

`connect` 関数はコネクションが確立されるまで、別に決められている再送回数だけ通信確立要求を再送する。その間 `connect` 関数の返り値は返って来ず、`connect` 関数の部分でソフトウェアが止まる。再送回数は `"/proc/sys/net/ipv4/tcp_syn_retries"` に登録されており、最小は 1 となっている。再送回数を変更する場合は `"/etc/sysctl.conf"` に `tcp_syn_retries=「再送回数」` と書き込む。再送間隔は 1 秒、2 秒、4 秒と倍数的に増えていく。経験則では、1 度目のコネクション接続要求が失敗した後、2 度目のコネクション接続要求、つまり 1 度目の再送でコネクションを確立できる可能性は極めて低く、ほとんどが 2 度目の再送 (= 合計 3 度目の接続要求) でようやくコネクション確立に成功する。2 度目の再送でコネクション接続が完了した場合、コネクション接続に費やした時間は約 3 秒になる。仮に再送回数を 1 回にしても、その 1 秒+2 秒の 3 秒後に返り値 `"-1"` が返ってくるので `connect` 関数に費やす時間は約 3 秒間になる。データ取集中にこの状態に陥ると、1 秒周期で動いているトリガー DAQ サイクルが約 3 秒間止まってしまうことになる。この対処として、`fcntl` 関数と `select` 関数を使用することで、`connect` 関数にタイムアウトを与えている。

- `fcntl` 関数 : `int fcntl(int fd, int cmd, ... /* arg */);`

- 使用法 : `fcntl(dstSocket, F_SETFL, O_NONBLOCK)`
- `select` 関数 : `int select(int nfds, fd_set *readfds, fd_set *writefds, fd_set *exceptfds, struct timeval *timeout);`
- 使用法 : `select(dstSocket+1, NULL, &set, NULL, &tv_to)`

`connect` 関数の前に `fcntl` 関数を実行する。`fcntl` 関数は指定したソケットをノンブロッキング状態にすることができる。その後の `connect` 関数で、このノンブロッキング状態のソケットを指定すると、すぐさま返り値“-1”を返すが、バックグラウンドで `connect` 関数の処理は動き続けている。`select` 関数は指定したソケットの状態を確認する関数であり、指定したソケットが通信可能な状態かどうか確かめることができる。さらにこの `select` 関数にはタイムアウトを設けることができる。したがって `connect` 関数ですぐさま返り値“-1”が返ってきた後に、`select` 関数を使用することで、あたかもタイムアウト付きの `connect` 関数のような使い方をすることができる。このタイムアウト値は 100 ミリ秒に設定している。これにより、その SD とは約 3 秒間通信ができない状態にはなるが、データ収集が 3 秒間止まるということが起きず、他の SD との通信は可能になることが予想された。しかし、実際に試してみるとデータ収集が止まることはなくなったが、その SD とは 4DAQ サイクル分通信ができないという結果になった。4 DAQ サイクル分 SD と通信できない時、最初の通信で `select` 関数のタイムアウトを示すエラーコード 115、その後 3 回は `connect` 関数でエラーコード 111 のエラーが起こる。この問題については原因を 5.2.5 節で、その解決法を 6.3.1 節で述べる。

- `write` 関数 : `int write(int fd, char *buffer, unsigned int nbyte);`
- 使用法 : `write(dstSocket, buf, n)`

`write` 関数はデータを送信するための関数で、RS モジュールの `Send` コマンドに対応する。`character` 型の配列である `buf` に格納されているデータを `n` Byte、コネクションが確立されている相手に送信する。

- `read` 関数 : `int read(int fd, char *buffer, unsigned int nbyte);`
- 使用法 : `read(dstSocket, buf, n)`

`read` 関数はデータを受信するための関数である。データを受信すると、`character` 型の配列である `buf` にデータを最大 `n` Byte 格納する。この関数は普通データを受信するまで返り値を返さない関数なので、ソフトウェア内部では `setsockopt` 関数を使用してタイムアウトを 50 ミリ秒と定めている。エラーコード 11 はデータを受信せずにタイムアウトになったことを示す。

- `close` 関数 : `int close(int fd);`
- 使用法 : `close(dstSocket)`

`close` 関数はコネクションを切断するための関数で、RS モジュールの `Socket` クローズコマンドに対応する。

タワー PC と SD 間の無線通信

3.3.1 節、4.2.3 節より、タワー PC が 1 台の SD と通信する際の流れについて簡潔にまとめると以下のようになる。

1. SD エレクトロニクスが TCP リッスンコマンドを実行し、コネクション待ち受け状態になる。
2. タワー PC から SD に対して socket、connect、fcntl、select 関数を実行し、TCP/IP 通信のためのコネクションを確立する。
3. コネクション確立後、タワー PC は write 関数を実行し、送信したいデータを SD に送信する。その後タワー PC は read 関数によってデータ受信待ち受け状態になる。
4. SD エレクトロニクスの RS モジュールがタワー PC からのデータを受信し、“AT+RSL_READ” という文字列と共に FPGA へと渡す。データは FPGA から CPU に渡されて処理が施された結果、それに対応するデータが再び FPGA を介して RS モジュールに渡され、タワー PC へと送信される。
5. データ受信待ち状態のタワー PC が、SD エレクトロニクスからデータを受信する。データ受信後、タワー PC は close 関数を実行し、コネクションを切断する。
6. タワー PC からのコネクションの切断を受け、SD エレクトロニクスの RS モジュールは “AT+RSL_CLOSE” という文字列を FPGA へと送信する。それによって FPGA はコネクションが切断されたと判断し、もう一度 TCP リッスンコマンドを実行し、コネクション待ち受け状態になる。

この流れを繰り返して、2.5.4 節で述べたようなトリガー DAQ サイクルが行われている。

タワー PC 内で動かすソフトウェアのソースファイルと使用方法

ソースファイルは main.c、HostTrigger.c、sendcmd.c、host.c、sd_idcode.c、commandlist.c、gps.c からなる。main.c にはトリガー DAQ サイクルの全体のプロセス、HostTrigger.c にはトリガー DAQ サイクルにおけるレベル 2 トリガーに関するプロセス、sendcmd.c にはトリガー DAQ サイクル以外で SD に対して個別にユーザーコマンドを送信する際のプロセス、host.c には前節で述べた関数を使用して SD とのコネクションの確立・データ送受信・コネクションの切断までを行うプロセス、commandlist.c には SD に対して送信するデータを生成するプロセス、gps.c には SD に対して送信するコマンドのうち GPS 関連のコマンドを制御するプロセスが記述されている。sd_idcode.c にはアレイ内の全 SD に関する情報 (ロジカル ID、ボード ID、IP 番号等) がリストとして記述されている。

実行形式のファイルは、“sendcmd” と “daq” の二つである。“sendcmd” はある SD1 台に対して指定したユーザーコマンドを送信するためのものである。第一引数にユーザーコマンド、第二引数に SD の IP アドレスの下位 8 bit、第三引数以降にパラメータを入れる。ただし、sd_idcode.c に記述されている SD しか通信はできない。ユーザーコマンドは現行の TA 実験で使用しているものと同じ数字にしてある。例えば、ユーザーコマンド “4000” を実行すると、SD に対してロジカルアドレスを与えるコマンド (コマンドコード “0101”)、パケットチェックを行うコマンド (コマンドコード “0003”)、ファームウェアのバージョンを確認するコマンド (コマンドコード “0004”) を順々に SD に送信する。SD は受信したコマンドコードに応じた動作をする。2018 年 2 月現在、実装しているユーザーコマンドは以下の通りである。

- 2000 : sudo ./sendcmd 2000 “SD の IP 番号下位 8 bit”
 - SD の時刻情報と位置情報を取得する (コマンドコード “0900”)。
- 2100 : sudo ./sendcmd 2100 “SD の IP 番号下位 8 bit”
 - SD の GPS モジュールにコマンドを送信する (コマンドコード “0903”)。
- 2200 : sudo ./sendcmd 2200 “SD の IP 番号下位 8 bit” “モード”
 - SD の座標測定のプロセスを制御する。モードには new、old、non、clr の 4 種類がある (コマンドコード “0904”)。
- 2300 : sudo ./sendcmd 2300 “SD の IP 番号下位 8 bit”
 - ユーザーコマンド”2200”による位置測定で得られたデータを取得する (コマンドコード “0905”)。
- 4000 : sudo ./sendcmd 4000 “SD の IP 番号下位 8 bit”
 - SD にロジカルアドレスを与え (コマンドコード “0101”)、パケットチェックを行い (コマンドコード “0003”)、ファームウェアのバージョンを取得する (コマンドコード “0004”)。ロジカルアドレスは sd_idcode.c を参照する。
- 4100 : sudo ./sendcmd 4100 “SD の IP 番号下位 8 bit”
 - SD の RSSI 値を取得する (コマンドコード “0102”)。ここで RSSI 値とは Received Signal Strength Indicator の略であり、受信信号の強度を示す数値である。
- 4300 : sudo ./sendcmd 4300 “SD の IP 番号下位 8 bit”
 - ファームウェアを SD に送信し、それを RAM に書き込ませた上で RAM で起動させる (コマンドコード “0205”)。
- 4400 : sudo ./sendcmd 4400 “SD の IP 番号下位 8 bit”
 - SD にリブートかける (コマンドコード “0206”)。
- 4600 : sudo ./sendcmd 4600 “SD の IP 番号下位 8 bit” “src” “dst”
 - SD のメモリの書き換えを行う (コマンドコード “0201”)。“dst”, “src” はそれぞれ 0x00 が ROM0, 0x01 が ROM1, 0x02 が RAM である。例えば “src” に 0x02, “dst” に 0x00 を指定した場合、その SD は RAM に書かれているファームウェアを ROM にコピーする。
- 4700 : sudo ./sendcmd 4700 “SD の IP 番号下位 8 bit” “DAQ パラメータ”
 - SD に対して DAQ のためのパラメータを与える (コマンドコード “0104”)。

“daq”はデータ収集(トリガー DAQ サイクル)を開始するためのものであり、ユーザーコマンドの “4000” でロジカルアドレスを与え、“4700” で DAQ パラメータを設定した後に実行する。なお、ユーザーコマンド “4000” を実行する前にトリガー DAQ サイクルを始めると、socket、connect、

fcntl、select、write は成功するが、SD はタワー PC に対してデータを送信しないので、read 関数はエラーコード 11 を返す。

通信する SD を増やすときには、sd lidcode.c にロジカルアドレス、ボード ID、IP 番号を書き込み、なおかつ main.c 内の通信相手の IP を記述する部分に SD の IP 番号を書き加える必要がある。現在のプログラムではサブネットが “192.168.123” の SD に対してしか通信ができない仕様になっている。

コマンドコードとそのパラメータ

SD はタワーから送られてきたデータのうちのコマンドコードとパラメータを見て、必要があれば返信のためのデータを生成し、タワーに返信する仕様になっている。2.5.4 節のトリガー DAQ サイクルを例に挙げて説明する。

トリガー DAQ サイクル中、タワー PC はコマンドコード “0505” を毎秒 SD に送信している。“0505” は分割モニターデータ、GPS タイムスタンプ、波形探査結果、レベル 1 トリガー数、1PPS 間のクロック数をタワーに送信せよ、という命令である。したがって、図 4.10 のようなデータが SD から返ってくる。タワー PC にてレベル 2 トリガーが発行されると、“0505” のパラメータとしてレベル 2 トリガー時刻 (GPS タイムスタンプとマイクロ秒単位の時刻) をセットした上で全 SD に送信する。これを受信した各 SD はそのレベル 2 トリガー時刻に自らが波形データを持っているかを探索する。その結果として、波形を持っていた SD は、次の秒のタワー PC からの “0505” コマンドに対して波形探査結果に持っていた波形の個数を入れて返信する。タワー PC は全 SD からの波形探査結果を参照し、波形を持っていた SD に対して波形送信命令のコマンドである “0502” を送信し、それを受けた SD はタワー PC にヘッダー情報 (16 Byte)+波形情報 (528 Byte) を送信する。

チェックコード(2)	ロジカルアドレス(2)	
コマンドコード(2)	Rseq(2)	
ポート ID(8)		
モニターデータ(16)		
GPSタイムスタンプ(2)	波形探査結果(1)	レベル1トリガー数(1)
1PPS間のクロック数 (4)		
レベル1トリガーテーブル (トリガー数×3)	チェックサム(1)	

図 4.10: コマンドコード “0505” によって SD がタワー PC に返すデータのフォーマット。カッコ内の数字はバイト数を表す。赤の部分はどのコマンドコードに対しても必ず付随するヘッダー情報 (16 Byte) である。紫の部分はコマンドコードによって内容が変わる。

第5章 TALE実験SDアレイのための新規データ収集システムの運用試験

TALE実験SDアレイを完成させるために、SDエレクトロニクスの無線LANモジュールをRSモジュールに交換し、ファームウェアを最適化した新規SDエレクトロニクスを製作した(3章)。またRSモジュールを使用することに伴って、タワーにアクセスポイントおよびタワーPCを新たに設置することになったため、タワーPC上で動かすデータ収集のためのソフトウェアを開発した(4章)。図5.1にTA実験SDアレイのデータ収集システムとTALE実験SDアレイの新規データ収集システムとの比較を示す。この章では2016年10月から2016年11月にかけてTALE実験サイトにて実施した新規データ収集システムの運用試験について述べる。運用試験は大きく分けて2回実施し、1回目の運用試験ではTALEアレイの14台のSDに対してのデータ収集テストを約1週間、2回目の運用試験ではTALEアレイの14台+18km離れたTA実験のSD1818に対しての長距離通信試験も兼ねたデータ収集テストを約1日間実施した。

	TA実験SDアレイ	TALE実験SDアレイ
DAQホスト	タワーエレクトロニクス	タワーPC
SDエレクトロニクス	ADLINK540Fを使用 (↑販売終了)	RS9110-N-11-22を使用
通信方式	TA独自のプロトコル	TCP/IPプロトコル
その他		アクセスポイントが必要
概略図		

図 5.1: TA 実験 SD アレイのデータ収集システムと TALE 実験 SD のデータ収集システムの比較

5.1 運用試験のためのセットアップ

5.1.1 タワーおよび TALE 実験 SD

運用試験では、実際に SD エレクトロニクスがインストールされている 16 台の SD のうち 14 台を使用した。残り 2 台の SD は、テストのために 2015 年 12 月に SD エレクトロニクスを大阪市立大学に持ち帰っていたので、運用試験には使用できなかった。

これら 14 台の SD エレクトロニクスの無線 LAN モジュールを RS モジュールに交換し、SD エレクトロニクスのファームウェアを運用試験時点でのものに書き換えた。SD に与える IP 番号には 192.168.123.101 から 114 を使用した。図 5.2 に TALE 実験 SD アレイのマップを示す。

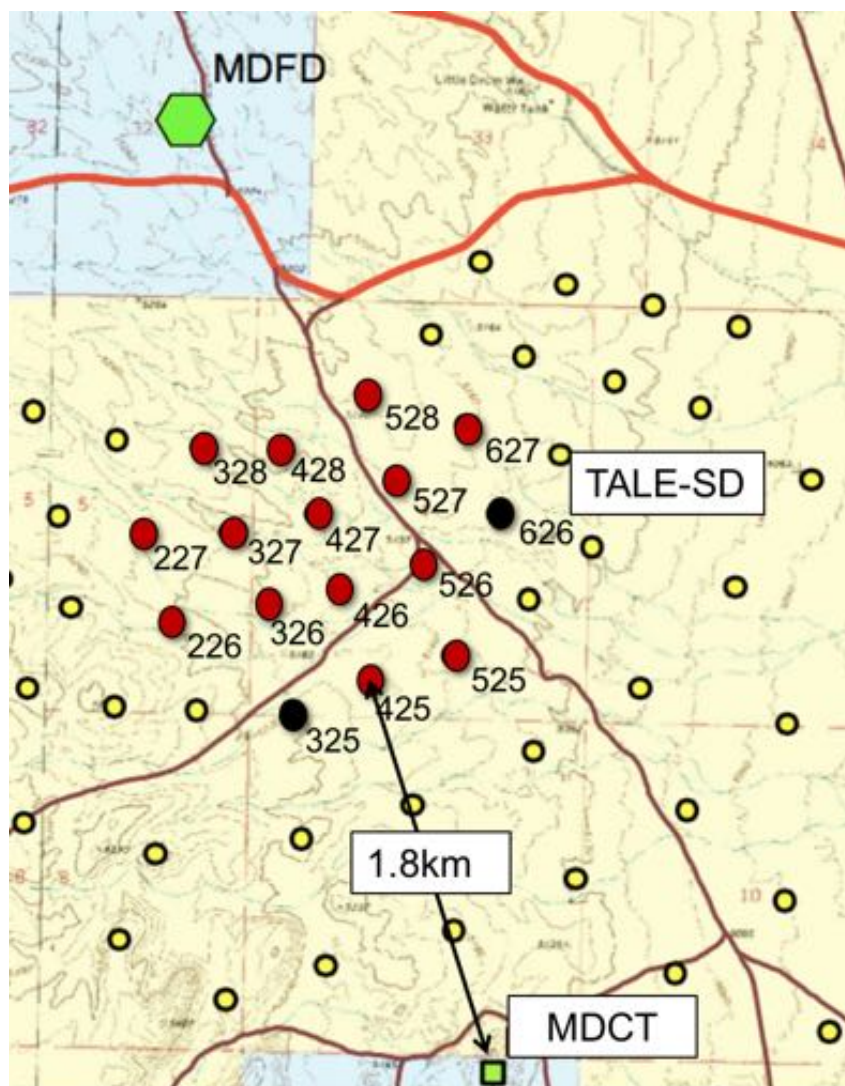


図 5.2: 運用試験時点での TALE 実験 SD アレイ。赤丸の検出器を今回テストで使用した。黒丸は SD エレクトロニクスを大阪市立大学に持ち帰っていたために今回の試験では使用できなかった SD、黄丸はその他の SD の設置予定地点。数字は SD のロジカルアドレス (個体識別番号) である。

TALE 実験で使用するタワーは MDCT (Middle Drum Communication Tower) である (図 5.2 下端近くの緑□) MDCT には 4 章で説明したようにアクセスポイント (IP 番号: 192.168.123.50) と

タワー PC(IP 番号: 192.168.123.45) 等を設置した。MDCT に設置されているネットワークルーターの IP アドレスは 192.168.123.40 なので、タワー PC のゲートウェイアドレスを 192.168.123.40 に設定することで、外部からタワー PC への SSH アクセスを可能にした。

また、電源供給については、アクセスポイントの給電に Cisco 純正の AC-PoE 電源供給機 (Cisco 社製 Power Injector AIR-PERINJ1500-2) を、タワー PC の給電には AC-DC アダプタを使用するため、AC 電源が必要であった。しかしタワーには 12VDC の電源しかないため、DC-AC 変換器と AC 出力のポータブルバッテリー (GoalZero 社製 23000-Yeti-400-Solar-Generator:以後ポータブルバッテリー) を使用した。PoE 電源供給機器、ポータブルバッテリー、DC-AC 変換器をタワーのソーラーパネルの裏の箱に格納した。

なお、この運用試験の結果、アクセスポイントへの給電方法を変更することになった。これに関しては、5.2.3 節で説明する。

5.1.2 長距離通信試験

MDCT と最も離れた SD との間の距離は約 10km である。すなわち TALE 実験 SD アレイ用データ収集システムで、最低でも 10 km 離れた SD と通信できる必要がある。よって 2 回目の運用試験では、18.2 km 離れた SD である DET1818 を追加してデータ収集をした。MDCT と DET1818 の位置を図 5.3 に示す。DET1818 には IP 番号: 192.168.123.116 を与えた。

なお、テストで用いる TALE 実験 SD は全て無線通信用アンテナとしてフラットアンテナを使用しているが、DET1818 の無線通信用アンテナにはより指向性の高いパラボラアンテナを使用した。当初は DET1818 でもフラットアンテナを使用する予定であったが、フラットアンテナでは、夜中には通信ができる一方で、昼間には通信ができなくなるという現象が 2 日連続で起きた。そこで、無線通信用アンテナをパラボラアンテナに交換すると安定した通信が可能になった。フラットアンテナからパラボラアンテナに交換し、これによって DET1818 の RSSI 値は -86 dBm から -84 dBm に上がった。このことから、少なくとも RSSI 値が “ -86 dBm” 程度になると通信に障害が出はじめるのではないかと考えられる。

5.2 運用試験の結果とその後の改良・更新

1 回目の運用試験は 2016 年 10 月 25 日 21 時 41 分 52 秒から 2016 年 11 月 1 日 14 時 33 分 23 秒までの期間にかけて実施し、この間に DAQ サイクルを 579079 秒分になった。2 回目の運用試験は 2016 年 11 月 3 日 0 時 0 分 0 秒から 2016 年 11 月 3 日 23 時 6 分 23 秒までの期間にかけて実施し、この間に DAQ サイクルを 83184 秒分になった。2 回目の運用試験では TALE の 14 台の SD だけでなく長距離通信試験として 18km 離れた DET1818 もデータ収集に参加させた。また、1 回目の運用試験で通信エラーレートの高かった DET0627 についてその原因を究明するために、無線 LAN モジュール部分 (無線 LAN モジュール+アンテナ接続コネクタ+電圧降下回路等を 1 枚の亚克力板に固定したもの) を DET0528 のものと交換した。これは 5.2.2 節で述べる。

5.2.1 タワー PC の稼働状況

1 回目の運用試験のデータ収集の結果得られたアレイの稼働状況を図 5.4 に示す。図 5.4 の稼働状況やトリガーレートから、安定してデータ収集ができていたことがわかる。レベル 2 トリガーレートは期待されるトリガーレートと矛盾せず、またタワー PC のハングアップ等でデータ収集

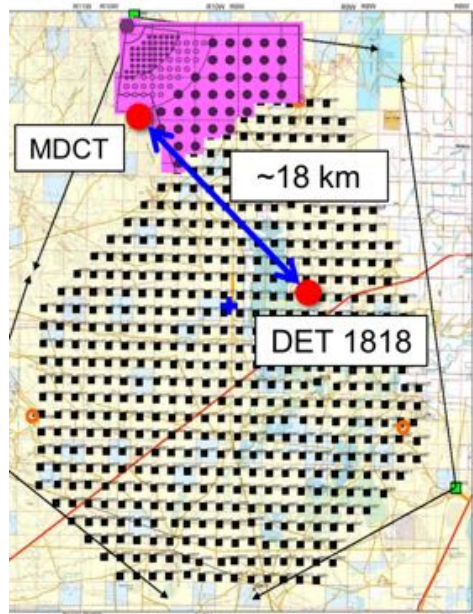


図 5.3: MDCT と DET1818 の位置。紫の領域は TALE 実験 SD アレイである。

が止まるという問題も生じなかった。なお、1 回目の運用試験ではレベル 2 トリガーは 4927 回発行された。

2 回目の運用試験でも 1 回目の運用試験と同様に、安定してデータ収集を行うことができていた。なお、2 回目の運用試験ではレベル 2 トリガーは 771 回発行された。

5.2.2 取得した SD のモニターデータと通信エラー

1 回目の運用試験で取得したモニターデータのうち、DET0528 のモニターデータを図 5.5 に示す。SD のモニターデータの各種パラメータのうち、通信状態を表すパラメータである“Com-merr/10min”は 10 分間 (計 600 回) の通信のうち、何回通信できなかったかを表す。これを見ると、10 月 31 日 17 時ごろに数十回の通信エラーが起きていることがわかる。これは、データ収集中にデータ収集で使用しているアクセスポイントを介して大容量のデータ通信をしてしまったことによって、電波干渉もしくはアクセスポイントがビジーな状態になってしまったという人為的なミスが原因である。1 秒だけのエラーは SD からデータを受信できない (read 関数のタイムアウト) こと、4 秒続くエラーはその SD と 4 DAQ サイクル分通信できなくなっていることが原因である (4.2.3 節参照)。

表 5.1 にそれぞれの SD の RSSI 値、1 回目の運用試験および 2 回目の運用試験での通信エラーレートを示す。SD14 台のうち 12 台の通信エラーレートは DET0528 と大差のないものになっていたが、DET0326 および DET0627 は他の SD より数十倍も通信エラーが多かった。図 5.6 に 1 回目の運用試験で取得した DET0627 のモニターデータを示す。この通信エラーの多さの原因を究明するために、2 回目の運用試験では、DET0528 の無線 LAN モジュール部分と DET0627 の無線 LAN モジュール部分を交換してみたが、RSSI 値は変わらず、通信エラーレートもほとんど変わらなかった。よって、通信エラーは無線 LAN モジュール起因ではないことがわかった。また表 5.1 より、通信エラーが多い DET0326 と DET0627 の RSSI 値は他の SD よりも低いというこ

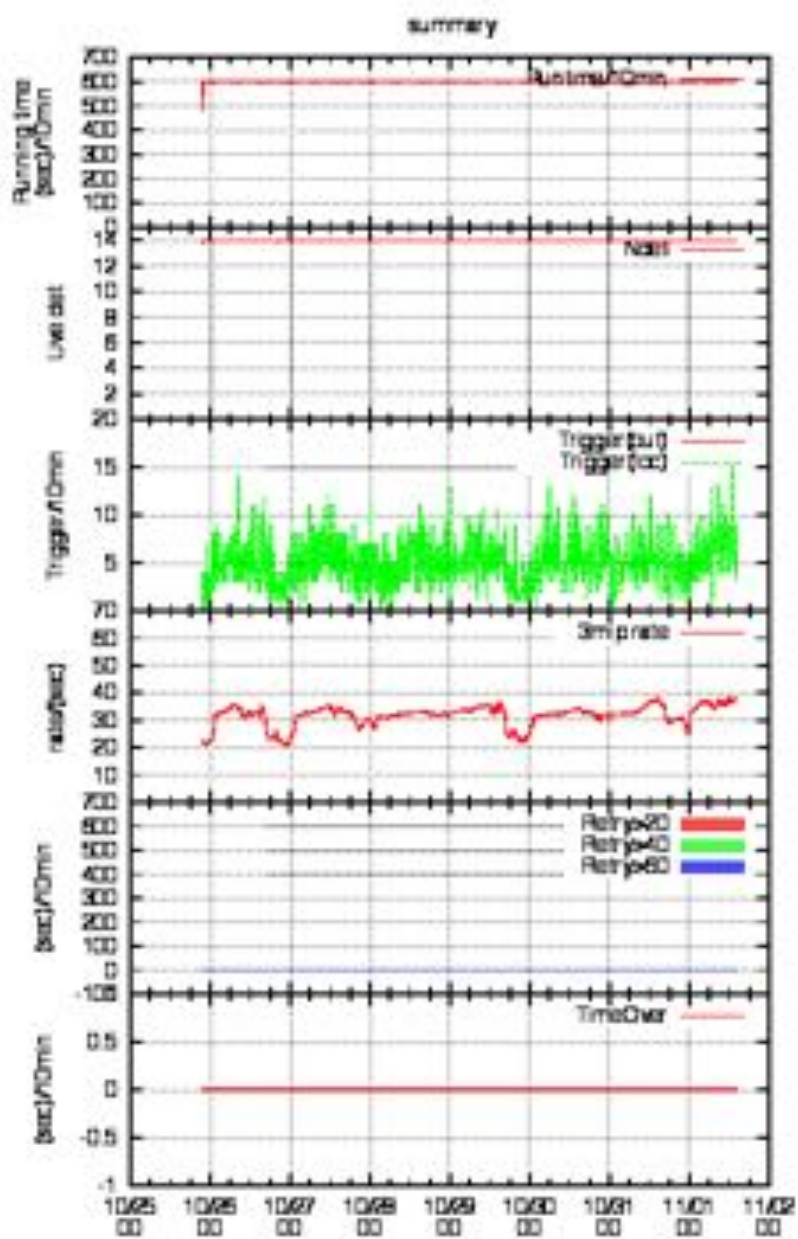


図 5.4: 1 回目の運用試験におけるアレイ全体のモニターデータ。上から稼働状況、稼働している SD の台数、10 分あたりのレベル 2 トリガー数、アレイ内の SD の 1 秒あたりのレベル 1 トリガー数の平均値、10 分あたりのリトライ回数 (この機能は実装していないので意味はない)、10 分あたりのタイムオーバー数を表す。

ともなく、これら2台のSDよりもRSSI値が低いSDも存在する。さらに2回目の運用試験の後にDET0627の無線LANアンテナをより指向性の高いパラボラアンテナに交換することでRSSI値を-64 dbmに強化してみたが、通信エラーレートは高いままであった。図5.7のように、TA実験SDアレイのデータ収集システムで取得したDET0627とDET0326の通信エラーレートを比較してみると、DET0627は他のSDに比べて通信エラーが多いSDではあるが、DET0326に関しては他のSDと変わらなかった。なお、TA実験SDアレイのデータ収集システムでは通信エラーになった後すぐに通信をリトライし、データをとりこぼさない仕様になっているが、このとき試験されたTALE実験SDアレイ用データ収集システムではリトライ通信を実装していなかった。DET0326およびDET0627の通信エラーが多い理由は現在も明らかになっていないが、電波のマルチパスの影響や、RSモジュールと相性の悪いSDエレクトロニクスのメインボードが存在する可能性が考えられる。

2回目の運用試験で長距離通信試験として使用したDET1818の通信エラーレートはDET0326およびDET0627ほどではないものの、低くはないという結果が得られた。DET1818に関してはRSSI値が他のSDより10程度低い、すなわち受信電波強度が10倍低いので、電波強度を上げることで通信エラーレートを下げることが可能かもしれない。

SD名	RSSI値	エラーレート (1st term)	エラーレート (2nd term)
DET0226	- 72 dbm	0.015 %(86回/579079回)	0.012 %(10回/83184回)
DET0227	- 74 dbm	0.016 %(92回/579079回)	0.001 %(1回/83184回)
DET0326	- 72 dbm	1.016 %(5886回/579079回)	0.718 %(597回/83184回)
DET0327	- 68 dbm	0.012 %(67回/579079回)	0.001 %(1回/83184回)
DET0328	- 75 dbm	0.025 %(143回/579079回)	0.022 %(18回/83184回)
DET0425	- 70 dbm	0.148 %(857回/579079回)	0.047 %(39回/83184回)
DET0426	- 74 dbm	0.050 %(287回/579079回)	0.007 %(6回/83184回)
DET0427	- 79 dbm	0.027 %(154回/579079回)	0.016 %(13回/83184回)
DET0428	- 74 dbm	0.015 %(84回/579079回)	0.002 %(2回/83184回)
DET0525	- 65 dbm	0.009 %(52回/579079回)	0.004 %(3回/83184回)
DET0526	- 72 dbm	0.016 %(94回/579079回)	0.004 %(3回/83184回)
DET0527	- 74 dbm	0.020 %(118回/579079回)	0.035 %(29回/83184回)
DET0528	- 75 dbm	0.028 %(161回/579079回)	0.013 %(11回/83184回)
DET0627	- 74 dbm	1.218 %(7051回/579079回)	1.396 %(1161回/83184回)
DET1818 (≈18 km)	- 84 dbm	non	0.270 %(225回/83184回)

表 5.1: 14台のTALE実験SDおよび18.2 km離れたTA実験SDのDET1818のRSSI値と通信エラーレート。RSSI値が大きいほど受信電波強度は高い。RSSI値が10違うと、受信電波強度は10倍違う。これらのRSSI値はRSモジュールのコマンド”at+rsi_rssi?”により取得したものである。通信エラーレートは通信エラー数を全通信トライ数(DAQサイクル分)で割ったものである。各項目毎のワースト3は太字で表している。

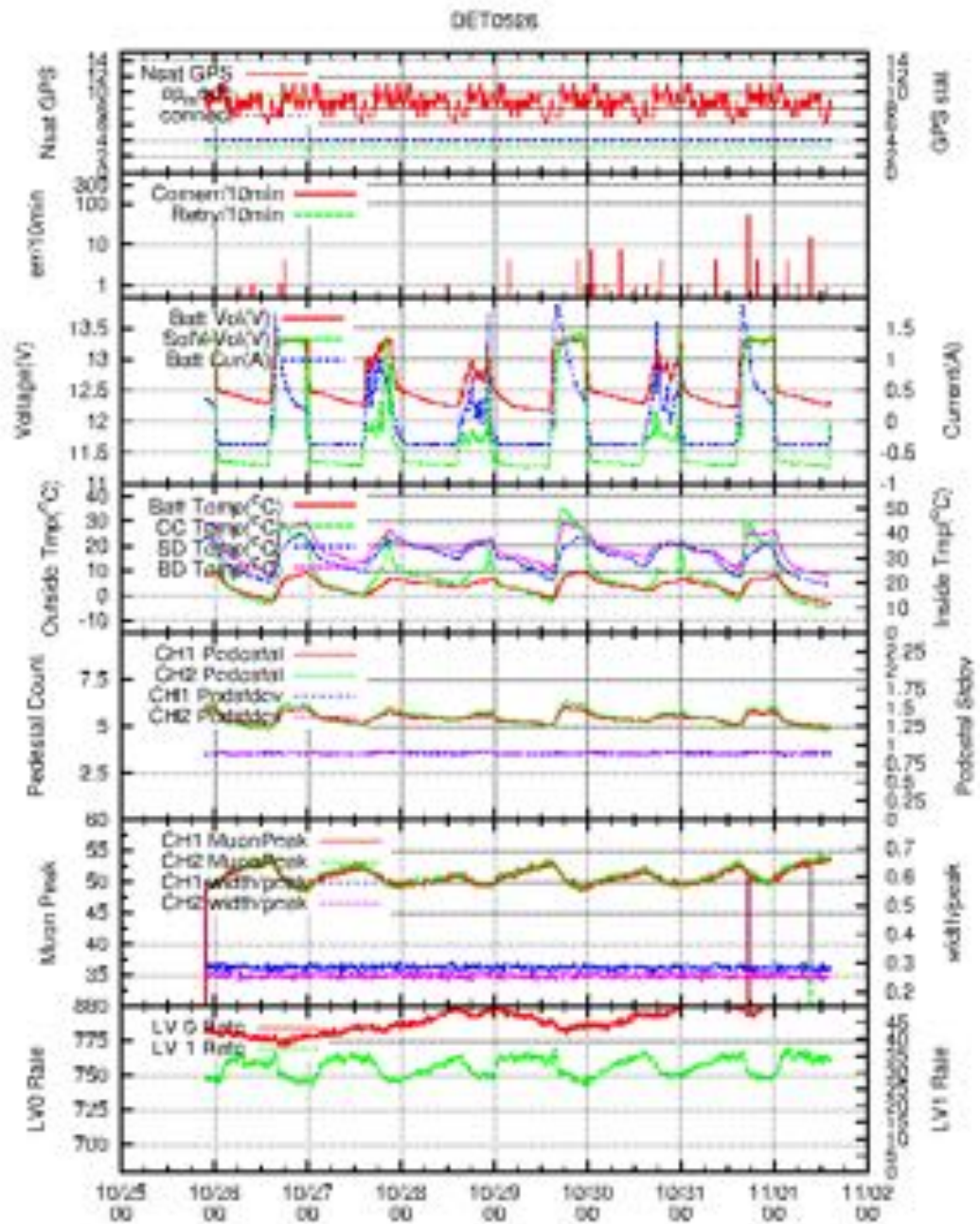


図 5.5: 1 回目の運用試験で取得した DET0528 のモニターデータ。上から、通信できている GPS 衛星数と GPS の状態、10 分間の通信エラー数とリトライ通信数、各種電流・電圧、各種温度、ペDESTAL とその標準偏差、1 MIP ピークと幅、トリガーレートを表す。10 月 31 日 17 時に起こっている数十回のエラーは人為的なミスによるもの。通信エラーには 1 度の発生により 1 秒だけのエラーで済むものと 4 秒間連続したエラーになってしまうものの 2 種類がある。

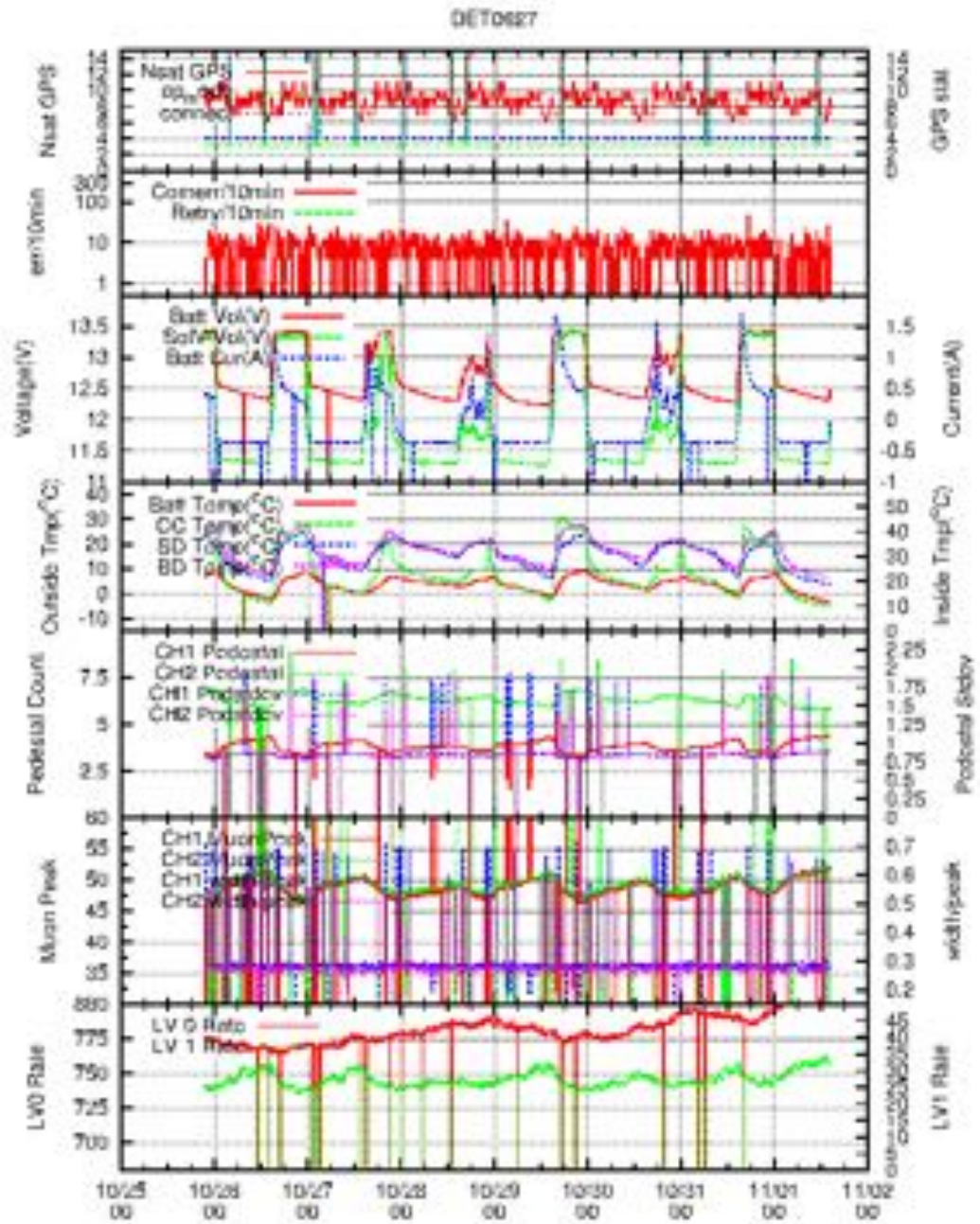


図 5.6: 1 回目の運用試験で取得した DET0627 のモニターデータ。上から、通信できている GPS 衛星数と GPS の状態、10 分間の通信エラー数とリトライ通信数、各種電流・電圧、各種温度、ペダスタルとその標準偏差、1 MIP ピークと幅、トリガーレートを表す。この SD はエラー数が他の SD と比べて多く、これは 2 回目の運用試験で図 5.5 に示したエラーが少ない DET0528 の無線 LAN モジュールと交換しても変わらなかった。

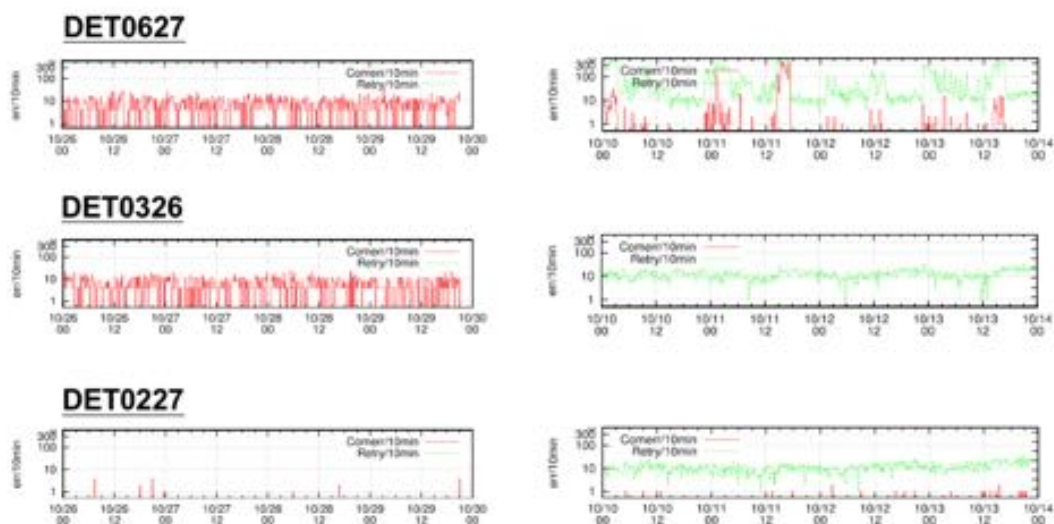


図 5.7: 通信エラーレートの比較。左が試験した TALE 実験 SD 用データ収集システムのもの、右が TA 実験 SD のデータ収集システムのもの。TA 実験 SD の方で緑色の線は通信エラー後に再通信を試みるリトライ通信のレートを示す。今回の運用試験では DET0627 と DET0326 のエラーレートが高かったのに対し、TA 実験 SD のデータ収集システムでは DET0326 のエラー数は DET0227 とさほど変わらない。

5.2.3 タワーによる電力関連のトラブルとアクセスポイントの給電方法

1 回目の運用試験では数日続いた悪天候が原因で、ソーラー発電量が低下したことにより、タワーのバッテリーの電圧が低下するという問題が生じた。これによりネットワークルーターの電源が落ちてしまい、外部からタワー PC に SSH 接続できなくなっていた。なお、復旧後データを確認すると、SSH 接続ができなかった期間でもデータ収集は継続して行えていたので、タワー PC とアクセスポイントへの給電はその間も正常に行われていたと考えられる。この問題の対処として、2 回目の運用試験ではタワーで使用していた必要のないネットワークハブ (消費電力 6 W) を取り除くことによって消費電力を抑えた。

また、2 回目の運用試験では物資と期間の関係上実際に試験することはできなかったが、TALE 実験 SD として稼働させる際の消費電力をさらに抑えるために、アクセスポイントの給電方法についても再考した。表 5.2 にアクセスポイントへの給電方法別の消費電力の測定結果を示す。ここでの消費電力は、給電のために使用する機器の消費電力とアクセスポイントの消費電力の合計値で、これは実際にアクセスポイントに給電している状態で測定した。タワーには 12VDC 電源しか存在しないため AC 電源を使用するにはインバータが必要でありそれによる消費電力がかかる点と、この測定結果より、MicroSemi 社製 PD-9501GO/12-24VDC が最良であると判断した。PD-9501GO/12-24VDC の外観を図 5.8、スペックを表 5.3 に示す。また、タワー PC に対する電源供給も AC/DC アダプタを使用する方法から、途中で AC を使用せず DC のまま給電するために手法を変更した。最終的なタワーのセットアップを図 5.10 に示す。DC&USB ソケットの外観は図 5.9 であり、12VDC の input で、12VDC のシガーと 5VDC の USB の output がある。アクセスポイントはこの DC&USB ソケットのシガーソケットから PD-9501GO/12-24VDC を通して給電する。タワー PC は DC&USB ソケットの USB ソケットから microUSB ケーブルを通して給

電する。

給電のために使用する機器	給電に使用する機器の入出力	消費電力
Cisco 社製 Power Injector AIR-PERINJ1500-2	入力:AC 出力:PoE	22 W
Cisco 社製 AIR-CORD-R3P-40NA=	入力:AC 出力:AC	15 W
MicroSemi 社製 PD-9501GO/12-24VDC	入力:DC 出力:PoE	14 W

表 5.2: アクセスポイントの給電方法別の消費電力。ここでの消費電力とは、給電のために使用する機器とアクセスポイントの消費電力の合計である。



図 5.8: MicroSemi 社製 PD-9501GO/12-24VDC

項目	仕様
サポート規格	IEEE802.3af
PoE 出力ポート数	1
PoE 出力	最大 60 W
入力電圧	10-36 VDC
DC 入力電流	2.0 A
寸法	214 mm(W) x 150 mm(H) x 70 mm(L)
重量	約 750 g
動作温度	- 40 °C-50 °C : 60 W 使用時

表 5.3: PD-9501GO/12-24VDC の仕様



図 5.9: バイク用 DC&USB ソケット (STAR ARROW 社 PS-1005) 12VDC のシガーソケットと 5VDC の USB ソケットがある。

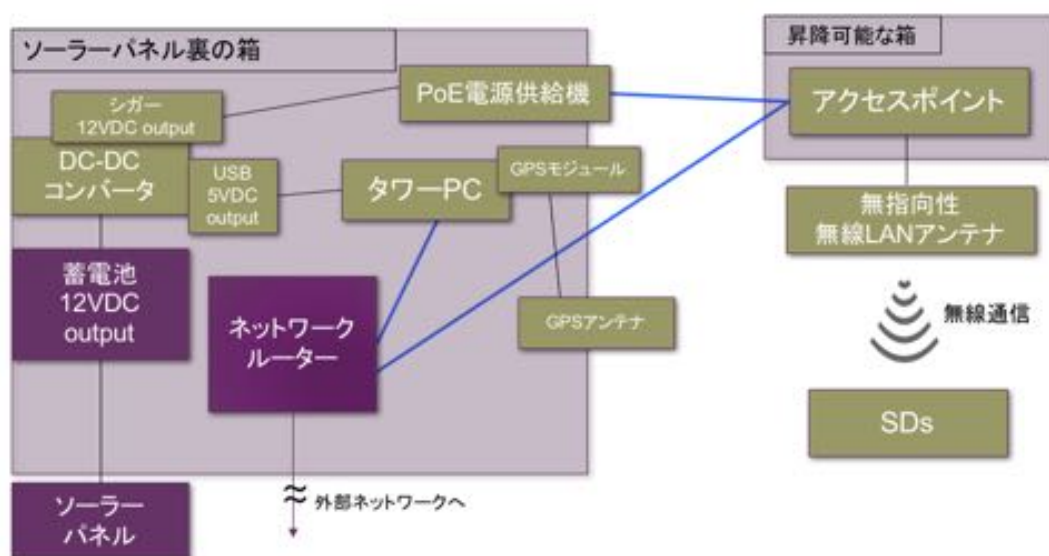


図 5.10: TALE 実験 SD アレイのための新しいタワーのセットアップの概略図。青線は LAN ケーブル、黒線はその他のケーブルを表す。

5.2.4 タワー PC が SD1 台あたりの通信に要した時間

タワー PC はトリガー DAQ サイクルで「レベル 1 トリガーテーブルとモニターデータの取得を開始した時刻」と「全 SD からの取得を完了した時刻」を記録している。そこから「全 SD からレベル 1 トリガーテーブルとモニターデータを取得するのに要した時間」を計算することができる。なお、レベル 1 トリガーテーブルおよびモニターデータを取得するのに要した時間とは、ソフ

トウェア内部では、「4.2.3 節 (タワー PC と SD 間の無線通信) の “2” から “5” までの処理+タワー PC 内での各種データの処理」にかかる時間のことで、これを「通信に要した時間」と呼ぶことにする。

図 5.11 に、SD1 台あたりの通信に要した時間のヒストグラムを示す。これは SD14 台との通信に要した時間を 14(SD の台数) で割って求めたものである。図 5.11 からわかるように、SD1 台あたりの通信に要した時間は約 10 ミリ秒である。タワー PC はトリガー DAQ サイクルの 1 サイクルでアレイ内の全 SD からレベル 1 トリガーテーブルおよびモニターデータを取得する必要があるが、これ使える時間は 1 秒のうちのおよそ 800 ミリ秒に設定されている。なお、残り 60 ミリ秒は SD がレベル 1 トリガーテーブルを生成する時間で、140 ミリ秒は波形取得のために使用する時間である。よって、試験した TALE 実験 SD のデータ収集システムでは 1 台のタワー PC でデータ収集できる SD は 80 台 ($\approx 800 \text{ ms} \times (1 \text{ SD} / 10 \text{ ms})$) であることがわかった。

TALE 実験 SD は合計 103 台設置する予定であるため、103 台の SD 全てを使ってデータ収集できるように高速化の必要性が生じた。高速化のための改良については 6.3 節で述べる。

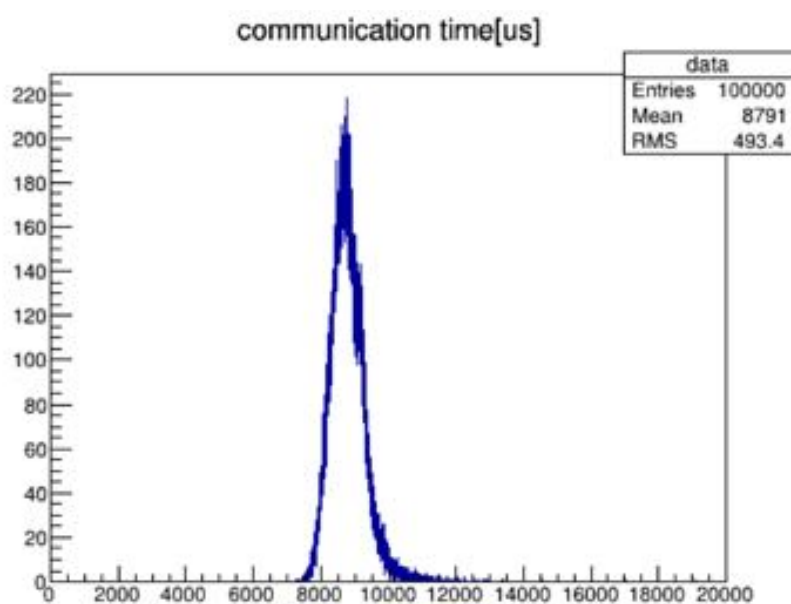


図 5.11: データ収集の際に SD1 台あたりの通信に要した時間 (単位: μs) のヒストグラム。

5.2.5 運用試験後のアップデート

5.1.1 節から 5.2.2 で述べた運用試験の結果から、通信エラーには 2 種類存在することがわかった。1 つ目は接続は確立できたが、タワー PC がデータを受信する際にデータを受信できずにタイムアウトになっているというものである。2 つ目は接続の確立に失敗した場合のものである。幸いタワー PC では、これら 2 つの通信エラーをエラーコードを見ることで判別できる。4.2.3 節で述べたように前者は read 関数のエラーコード “11” の通信エラーが生じるのに対して、後者は select 関数のエラーコード “115” で通信エラーが始まる。

これら 2 種類の通信エラーの対処および、データの取りこぼしを減らすために、運用試験後にタワー PC のソフトウェアおよび SD エレクトロニクスファームウェアをアップデートした。こ

の節ではこのアップデートに関して説明する。これらのアップデートは、大阪市大で SD3 台に対して動作試験を実施し、正常に動作することを確認済みである。

4 DAQ サイクル分通信できなくなる問題 (ハーフコネクション問題)

5.2.2 で述べた運用試験の結果をみると、4.2.3 節で述べた 4 DAQ サイクル分続く通信エラーが通信エラーの大半を占めていた。運用試験後、この通信エラーについて詳しく調べてみたところ、4 DAQ サイクル分通信エラーが続く状況に陥った際に、SD 側で Socket クローズコマンドと TCP リッスンコマンドを実行することでタワー PC との通信をすぐに復帰できることがわかり、現在では通信エラーを 1 DAQ サイクルだけに抑えることができています。上記の処理で復帰できることから、タワー PC 側はコネクション接続に失敗していると判断しているのに対して、SD エレクトロニクス側はコネクションが確立できたと認識している、いわばハーフコネクション状態に陥っていたことが原因だと考えられる。SD エレクトロニクスはハーフコネクション状態に陥っていることを直接的に判断できない。あくまで SD エレクトロニクスは、タワー PC とのコネクションが確立されていると思い込んでいるからである。コネクションの確立をする限りこの問題は生じてしまうので、これを回避するにはコネクションの確立の必要がない通信方法が求められた。そのため TALE 実験 SD のタワー PC と SD 間の通信はコネクションレス型の UDP を使用することにした。それについては 6.3 節で詳しく述べる。

リトライ通信について

TALE 実験 SD アレイのデータ収集システムでは、データ取集中に通信エラーが起きたとしても、そのデータは諦めて次の SD との通信に進んでいる。なお、TA 実験 SD アレイのデータ収集システムでは、通信エラー後すぐにその SD に対して再度通信を試みる。これを「リトライ通信」と呼んでいる。TALE 実験 SD のデータ収集システムでも、select 関数でエラーコードが 115 と表示され、4 DAQ サイクル分通信エラーが続く事象以外は、エラー後 10 ミリ秒程度待ってからリトライ通信することで、ほとんどの場合はデータを取得できることがわかった。しかし、通信エラー後に 10 ミリ秒程度待ってからリトライ通信をするということは、10 ミリ秒程度のタイムロスをしてしまうことになる。それならば、残りの全 SD と通信が終わってから、通信エラーを起こしていた SD との通信を再度試みたほうが良いと考えた。以上の理由から TALE 実験 SD のデータ収集システムではリトライ通信を実装せず、以下で述べる「リカバリー通信」を実装することにした。

1PPS シグナルの受信とレベル 2 トリガー判定の間の時間を利用したリカバリー通信

図 2.18 のように、SD は 1PPS を受信した後 60 ミリ秒間、モニターデータ及び、レベル 1 トリガーテーブルを作成しており、タワー PC はこの間は SD と通信せず、レベル 2 トリガー判定を行なっている。しかしタワー PC がレベル 2 トリガー判定に費やす時間はせいぜい多くて 5 ミリ秒程度であり、55 ミリ秒、すなわち SD5 台程度と通信できる時間が余っている。よって 1PPS シグナルの受信とレベル 2 トリガー判定の間の 55 ミリ秒を利用して、前の秒で通信エラーになっていた SD に対して通信し、前の秒で取りこぼしたデータを取得するような仕組みを実装した。これを以後「リカバリー通信」と呼ぶことにする。

リカバリー通信は、前述した 2 種類の通信エラー (read 関数のタイムアウト、ハーフコネクション問題) 両方に使える方法で、データの取りこぼしが格段に減ることが期待されるが、55 ミリ秒

しかないので、5ないし6台分の通信エラーしかまかなえない。しかし、図5.1で示したように、通信エラーレートは2%未満であり、ハーフコネクションからの復帰を実装できたことによって、これ未満に抑えることが可能になっている。よって、仮に1秒間に80台のSDと通信したとしても、通信エラーになるSDは多くても2台程度という計算になり、リカバリー通信だけでも十分にまかなえることがわかる。このリカバリー通信の実装とTALE実験SDのデータ収集における性能については6.4.5節で述べる。

第6章 TALE実験SDアレイ設置と運用

2.3節で述べたように、5章の運用試験段階ではSDは35台のみ設置されており、そのうちエレクトロニクスがインストールされている16台で稼働していた。2016年7月にTA実験の拡張計画であるTAx4実験用SDとエレクトロニクスの組み立て作業が始まり、2017年2月にそれら装置を試験的にTALE実験SDアレイとして設置した。この章ではその設置の概要とその後の運用、パフォーマンスについて述べる。

6.1 TALE実験SDの設置と新規システムへのアップグレード

2017年2月に103台中すでに設置の完了している35台を除く68台のSDを設置した。また、103台中67台のSDに対してエレクトロニクスをインストールした。このうち16台のSDにインストールされていたエレクトロニクスは新規システムへの変更のため、新規エレクトロニクスと交換された。2017年6月中頃にさらに20台のSDに対してエレクトロニクスをインストールした。

6.1.1 タワーのセットアップ

5.2.3節で述べたように、運用試験後にタワーのセットアップを変更した(図5.10)。タワーPCのIPアドレスは192.168.123.46、アクセスポイントのIPアドレスは192.168.123.50に設定した。アクセスポイントのSSIDはTALESDAPであり、通信塔周辺ではこのネットワークに接続することで、無線経由でタワーPCにログインすることができる。また、タワーに設置しているルーターのDMZを192.168.123.46に設定しており、外部のネットワークからタワーPCにログインすることも可能である。

6.1.2 SDの設置とエレクトロニクスのインストール

2017年2月にSDの設置をした。この作業で設置したSDは68台である。また、エレクトロニクスのインストールは2017年の2月と6月の2回に分けて行った。16台の既設SDの旧エレクトロニクスは新規のものと交換され、51台の新規設置SDにはエレクトロニクスをインストールしたので、結果として67台のSDに対して新規エレクトロニクスがインストールされたことになる。

SDの組み立てと輸送

山梨県の東京大学宇宙線研究所明野観測所でSDのシンチレーターボックスを組み立て、これをユタ州デルタ市にあるCosmicRayCenter(以下CRC)へと輸送した。CRCではシンチレーターボックス、SD架台、エレクトロニクスボックス、バッテリーをSDとして組み立てた。図6.1は完成したSDが並べられている外観である。



図 6.1: 完成した SD が並べられている外観

SD とエレクトロニクスの設置

CRC での SD 組み立て完了後、トラックで TALE 実験 FD (TA 実験の Middle Drum ステーションの隣に位置している) 近くにあるステージングエリアへと輸送した。図 6.2 はトラックで輸送された SD がクレーンで並べられる様子であり、図 6.3 はその作業完了後の外観である。ステージングエリアへの SD の配置完了後、各 SD に対してアンテナとアンテナ固定用ポールを取り付けた。

ステージングエリアから各 SD を TALE 実験 SD アレイの規定の位置へと輸送するにはヘリコプターを使用した。SD の設置完了後、各 SD へのエレクトロニクスのインストールとアンテナ調整を行った。エレクトロニクスのファームウェアは各 SD によって異なる。これは、TCP/IP プロトコルを使用してタワー PC と通信するので、各 SD のエレクトロニクスが持つ IP は固有のものである必要があるからである。

エレクトロニクスのインストール完了後に起動させると、3.2 節で述べたように、エレクトロニクスはアクセスポイントに Join し、その電波強度を測定する。その強度を読み取りながらアンテナの高さや向き、角度を調節し、最も強度の強い位置でアンテナを固定する。以上の工程を経て SD 設置作業が完了した。

エレクトロニクスのインストールは 2017 年 2 月と 6 月の 2 回に分けて行われた。6 月の作業終了時点で、エレクトロニクスのインストールが完了している SD の台数は 87 台である。エレクトロニクスのインストール完了状況を図 6.4 に示す。



図 6.2: ステージングエリアにクレーンで配置される SD の外観



図 6.3: ステージングエリアに設置が完了した SD の外観

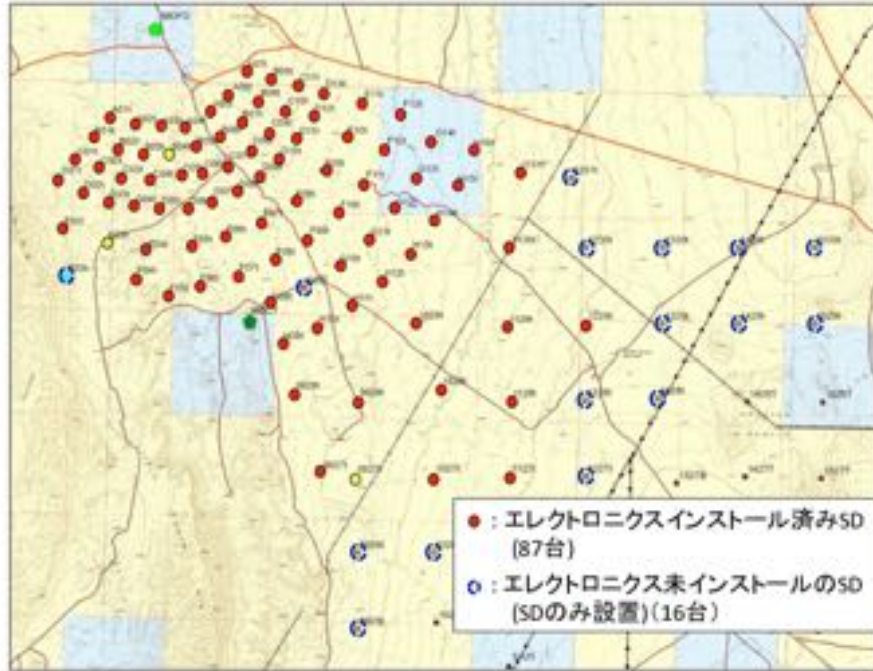


図 6.4: エレクトロニクスのインストール完了状況を示すマップ

6.2 定常運転にむけてのアップグレード

TALE 実験 SD の設置完了後、タワー PC のプログラム、エレクトロニクスのファームウェアに対して改良を加えた。この節ではその各アップグレードについて述べる。

6.2.1 データの保存方法

タワー PC によって各 SD のトリガー・波形データが収集される。5 章の運用試験段階では、タワー PC の DAQ によって取得されたデータは標準出力へと出力され、それを linux の script コマンドを実行することにより保存していた。しかし、TA 実験 SD アレイではデータは 1 時間ごとに別のファイルに保存されており、TALE 実験 SD アレイのシステムでもその形式を踏襲する必要がある。そのため、それまでの script コマンドによるデータの保存から、DAQ プログラム内でファイルを生成しそのファイルに書き込んでいく方法を採用した。このときファイルの作成に“fopen 関数”、データの書き込みに“fprintf 関数”、ファイルを閉じるのに“fclose 関数”をそれぞれ使用した。また、1 時間ごとに違うファイルに切り替えるのには“gettimeofday 関数”を使用した。GPS モジュールからの PPS 信号によって DAQ のサイクルが開始すると、まず gettimeofday 関数によって時間情報を取得し、時 (hour) が変化していた場合にそれまで使用していたファイルを閉じて新規ファイルを作成するようにしている。また 1 時間ごとに生成される DAQ のデータの名称は、例えば 2018 年 2 月 9 日 15 時のデータである場合、“MD020915.Y2018”となるようにした。

6.2.2 無線経由によるSDエレクトロニクスのファームウェア更新システムの実装

SDエレクトロニクスをPCと有線で接続し、シリアル通信でコマンドを送ることによってSDエレクトロニクスのファームウェアを更新することができる。しかし、TALE実験用SDのように砂漠地帯に103台撒かれた検出器のファームウェアを、1台1台アクセスして更新することは現実的でない。TA実験用SDではこうした問題を解消するために、無線通信によってファームウェアを更新できるようにしている。TALE実験用SDでもこれを可能にするために、タワーPCにこのコマンドを実装した。以下に、タワーPCでのコマンドとそれによるファームウェア更新の手順を示す。

1. `./sendcmd 4000` “SDのIP番号下位8bit”

- SDにロジカルIDを与える。SDと通信する際はまずこのコマンド“4000”を送る必要がある。このコマンドがSDで受け取られ正常に処理されると、SDが動作しているファームウェアのバージョン等がタワーPCに送信される。タワーPCでこれを受信することができれば次の手順へと進む。

2. `./sendcmd 4300` “SDのIP番号下位8bit”

- ファームウェアをSDに送信し、それをRAMに書き込ませた上でRAMで再起動させる。

3. `./sendcmd 4000` “SDのIP番号下位8bit”

- 再起動したSDに再度コマンド“4000”を送る。タワーPCで受け取ったSDのファームウェアのバージョンが1度目のコマンド“4000”によるものから更新されていることを確認する。更新されていればSD内でファームウェアの受信と処理が正常にされているので次の手順へとすすむ。更新されていなければ、再度上のコマンド“4300”を送信する。

4. `./sendcmd 4600` “SDのIP番号下位8bit” 20

- SDにファームウェアをRAMからROM0にコピーさせる。

5. `./sendcmd 4400` “SDのIP番号下位8bit”

- SDをROM0のファームウェアで再起動させる。

6.2.3 DAQに使用するSDの選択

通信状態が不安定、もしくは何かしらの原因でハングアップしているようなSDがアレイの中に存在しているとき、そのようなSDをDAQに参加させると通信に失敗してしまうので、結果的にタイムアウトにかかる30msを常にロスしてしまうことになる。DAQ開始時にそういったSDを排除するために、ソフトウェア内で稼働させるSDを選択している。以前はソフトウェア内に稼働させるSDを直接記述しており、DAQ開始時にそれを編集してコンパイルするという手法を取っていた。しかし、それでは手間がかかる上、編集の際に必要な部分まで書き換えてしまう可能性も含んでいる。そのため、稼働させるSDのIPのリストとして“liveiplist(日付).dat”ファイル生成し、ソフトウェア内でそれを読み込むように変更した。例えば、2018年2月9日にRUN

を開始する際は、“liveiplist180209.dat”という名称にする。これによって、稼働SDを変更するたびにソフトウェアをコンパイルし直す必要が無くなり、またRUNごとの稼働SDの状況をデータとして残すことができるようになった。

6.2.4 DAQ 途中にハングアップした SD の削除

前6.2.3節はDAQの開始時点で通信できないSDを除外するためのシステムである。この節で扱うのは、DAQ開始時点では通信可能であったが、途中からハングアップして通信がそれ以降全くできなくなってしまったSDである。このようなSDが存在する場合、タイムアウトによって通信失敗とタワーPCが判断するまでの時間である30ミリ秒をロスしてしまう。このロスの影響が最も現れるのはリカバリー通信に対してである。リカバリー通信は5.2.5節で述べたように、通信エラーによりデータ回収ができなかったSDに対して、次のサイクルのスタートから55ミリ秒の間に再通信を行うものである。通常はこのリカバリー通信によって前のサイクルでエラーしたSD数台分のデータを回収してレベル2トリガー判定をすることができる。しかしハングアップなどにより通信が全くできないSDが存在すると、このSDに対して毎サイクルでリカバリー通信が実行されてしまう。すると1台につき30ミリ秒のロスが発生するので、もし2台以上このようなSDが発生すると、リカバリー通信に割り当てられた時間を使い果たしてしまうため、リカバリー通信が機能しなくなってしまう。以上の理由から、通信が全くできないSDに対する通信を止めるシステムを実装した。その流れを以下に示す。

1. 20回以上連続でトリガーデータ回収に失敗すると、そのSDに対するトリガーデータ回収をやめる。
2. 1分後にトリガーデータ回収を再開する。
 - この、トリガーデータ回収停止後にSDが正常に通信できる状態に回復しているか試す試験通信を、ここでは便宜上「トライアル通信」と呼ぶことにする。トライアル通信では、通信に失敗してもリカバリー通信は実行されない。
3. 20回連続でトライアル通信に失敗した場合、再びトリガーデータ回収をやめる。トライアル通信に成功した場合は、このSDは正常状態へ復帰したと判断し、このプロセスから抜ける。
4. 正常に復帰しない場合はさらに5分後、20分後、1時間後、24時間後にそれぞれ20回連続のトライアル通信を実行する。24時間後のトライアル通信にも20回連続で失敗した場合、以降そのSDに対しては通信をしない。

6.2.5 通信プロトコルをUDPへと変更

5.2.4節で述べたように、運用試験時に測定したSD1台あたりの通信に要する時間は平均8.8ミリ秒程度あった。DAQサイクルの1サイクルでアレイ内の全SDからレベル1トリガーテーブルおよびモニターデータを取得するのに使える時間は1秒のうちのおよそ800ミリ秒である。よって、そのままのプログラムでは単純計算でSD90台と通信するのが限界であり、TALE実験SDの103台との通信は不可能ということになる。そのため、高速化を図るために、使用するプロトコルをTCPからUDPへと変更した。次の6.3節で詳しく述べる。

6.3 TCP から UDP へ

6.3.1 TCP と UDP の違い

TCP/IP は“アプリケーション層”、“トランスポート層”、“インターネット層”、“ネットワークインターフェース層”という4つの階層から成り立っている。中でも“トランスポート層”はデータの転送を制御する役割があり、プロトコルに従ってデータの誤りの検出や転送元への再送を要求などの機能がある。TCP と UDP はこの“トランスポート層”のプロトコルである。TCP と UDP の違いとしてまず挙げられるのは接続の確立の有無である。TCP は3Way-Handshake と呼ばれる方式でクライアントとサーバーで接続の確立をしてからデータ転送を行う。また、データの送受信ではデータをパケットという単位で転送し、「シーケンス番号」と呼ばれる番号を使用する。送信する側は送信データにシーケンス番号をつけて送信し、受信側は受け取ったデータのシーケンス番号を確認応答として送信元へ送る。それによって、送信側は受信側がきちんとデータを受け取ったことを確認することができ、受信側はシーケンス番号を参照することで、パケットのロスや順番の前後を確認することができる。

対してUDP は接続の確立を行わずに通信を行う。また「シーケンス番号」を持たず、受信側はデータを受け取っても確認応答をしない。そのため、送信側は受信側がきちんとデータを受け取ったのか判別することが不可能であり、受信側はパケットのロスや順番の前後を確認することができない。

しかし、UDP では接続の確立がないなど、通信にかかるプロセスがTCP より少ないため高速という利点がある。また、データ転送にかかるヘッダーもTCP の20Byte に比べ、UDP は8Byte と小さい。UDP では受信側がパケットのロスや順序を判別できない、という一般的に不利な点についてはTALE 実験SD アレイのDAQ においては問題にならない。なぜなら、UDP のパケットの最大データサイズは65507Byte であり、DAQ における1台のSD との通信はそのデータサイズより小さいので、1つのUDP パケットでデータが転送されるからである。例えば、レベル1 トリガー・モニターデータはレベル1 トリガーが20Hz(典型値)だとすると、 $41 + 3 \times 20 = 101$ Byte であり、波形データであれば1 波形あたり384Byte で、1パケットに収まるからである。

また、5.2.5 節で述べたハーフ接続問題は、TCP を使用した通信での接続の確立において起こる問題である。使用するプロトコルをUDP にした場合、そもそも接続の確立をせずに通信をするので、この問題は起こらない。

以上で述べたような、TCP と比べ高速である点とハーフ接続が起こらない点をUDP の利点として、UDP を使用したデータ通信を実装した。

6.3.2 タワー PC におけるソフトウェア変更点

4.2.3 節で述べたタワー PC のソフトウェアで使用する関数はTCP を用いている。UDP を使用するにあたって、ソフトウェアを変更した。

使用する主な関数

以下に使用する主な関数とその関数に与えている引数を記す。

- socket 関数 : `int socket(int domain, int type, int protocol);`
 - 使用法 : `mySocket=socket(AF_INET, SOCK_DGRAM, 0)`

socket 関数は通信のために使用するソケットを作るための関数であり、TCP で使用した関数と同じである。2 つ目の引数は通信方式を指定するためのものであり、TCP の場合は SOCK_STREAM を与えるが、UDP の場合は SOCK_DGRAM を与える。返り値には、そのソケットと 1 対 1 で対応するソケットディスクリプタが入れられる。これ以後このソケットディスクリプタを mySocket と表す。

- sendto 関数 : `int sendto(int socket, char *buffer, int length, int flags, struct sockaddr *address, int address_len);`
 - 使用法 : `sendto(mySocket, buf, n, 0, &dstAddr, addrlen)`

sendto 関数はデータを送信するための関数である。char 型の配列である buf に格納されているデータを nByte、dstAddr に表される IP アドレスへと送信する。

- recvfrom 関数 : `int recvfrom(int socket, char *buffer, int length, int flags, struct sockaddr *address, int *address_length);`
 - 使用法 : `recvfrom(mySocket, buf, 399, 0, &dstAddr, addrlen)`

recvfrom 関数はデータを受信するための関数である。データを受信すると char 型の配列である buf にデータを最大 399Byte 格納する。この時受信したデータの送信元の IP アドレスは dstAddr に格納される。

もしタワー PC から sendto 関数によって送信されたデータを SD が受け取られなかった場合や SD がデータの送信に失敗した場合、タワー PC のもとにデータは送られてこない。そうなると、recvfrom 関数自体にはタイムアウトがないのでソフトウェアが停止してしまうことになる。そのため、TCP の場合と同じように select 関数を使用してタイムアウト機能を実装している。

- select 関数 : `int select(int nfds, fd_set *readfds, fd_set *writefds, fd_set *exceptfds, struct timeval *timeout);`
 - 使用法 : `select(mySocket+1, &fds, NULL, NULL, &tv)`

select 関数は指定したソケットの状態を確認する関数であり、そのソケットが通信可能な状態かどうか確かめることができる。タイムアウトは最後の tv で与えており、30 ミリ秒に設定している。

タワー PC 内で動かすソフトウェア

4.2.3 節で述べたように、タワー PC で動かす実行ファイルとしては “./daq” と “./sendcmd” がある。データ通信に UDP を使用するソフトウェアを新しく作成するにあたって、実行ファイルの名称も変更した。以前までの TCP による通信を行う実行ファイルを “./daq” と “./sendcmd”、新しく作成した UDP による通信を行う実行ファイルを “./daqu”、“./sendcmdu” とした。

6.3.3 SD エレクトロニクスにおけるファームウェアの変更点

通信に使用するプロトコルを TCP から UDP に変更するために FPGA から RS モジュールに対してシリアル通信で送信するコマンドを 3.2.2 節、3.2.3 節のものから変更した。また、TALE 実験 SD の運用にあたってアクセスポイントのセキュリティを設定したので、それに対応するためのコマンドも実装した。変更後のコマンドの流れは以下のようである。

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. PSK コマンド (ネットワーク事前共有鍵の設定)
6. Authmode コマンド (ネットワークセキュリティの設定)
7. Join コマンド (アクセスポイントと接続)
8. IP 設定コマンド (自らの IP アドレスの設定)
9. UDP ソケットコマンド (UDP ソケットのオープン)
10. Send コマンド (コネクションを確立した相手に対してのデータ送信)
11. Socket クローズコマンド (ソケットのクローズ)

通信に UDP を使用するために変更したのは UDP ソケットコマンドであり、アクセスポイントのネットワークにおけるセキュリティ用に追加したのは PSK コマンドと Authmode コマンドである。この 3 つのコマンドについて以下で説明する。

UDP ソケットコマンド

このコマンドは RS モジュールの UDP ソケットをオープンするコマンドである。オープンしたソケットに指定したポートを割り当て、データ送受信が可能な状態にする。

- `at+rsi_ludp=lport`

`lport` は RS モジュールがデータ通信に使用するポートである。TALE 実験 SD ではポートに 8101 を割り当てている。

PSK コマンド

このコマンドは接続するネットワークの事前共有鍵 (Pre Shared Key、PSK) を設定するコマンドである。

- `at+rsi_psk=pre-shared_key`

`pre-shared_key` はアクセスポイントのネットワークにおけるセキュリティの事前共有鍵であり、このコマンドを実行することによって RS モジュールに対して設定ができる。RS モジュールはアクセスポイントのネットワークに参加する際にここで設定した事前共有鍵を使用する。

Authmode コマンド

このコマンドは接続するネットワークのセキュリティを設定するコマンドである。

- `at+rsi_authmode=authvalue`

authvalue はアクセスポイントのネットワークにおけるセキュリティのタイプである。0-4 の値を設定でき、0 から順に、WEP Open(open system)、WEP(shared-key)、WPA、WPA2、No security である。WEP の open system と shared-key は認証方式の違いである。TALE 実験 SD アレイで使用するアクセスポイントのネットワークは WPA であるので、*authvalue* には 2 を指定している。

6.3.4 SD エレクトロニクスのファームウェアの書き換え

UDP を使用して通信する SD 用ファームウェアの作成後、TALE 実験 SD のエレクトロニクスのファームウェア書き換え作業をした。ファームウェアの書き換えはタワー PC から無線通信で行う。具体的な手順は以下の通りである。

1. `sudo ./sendcmd 4300 “SD の IP 番号下位 8 bit”`
 - ホスト PC から SD へファームウェアを送信し、SD はそのデータを RAM に書き込む。完了すると書き込んだファームウェアで起動する。
2. `sudo ./sendcmd 4600 “SD の IP 番号下位 8 bit” 2 0`
 - SD はこのコマンドを受信すると RAM に書き込んだデータを ROM0 にコピーする。
3. `sudo ./sendcmd 4400 “SD の IP 番号下位 8 bit”`
 - SD はこのコマンドを受信すると再起動する。起動する際は ROM0 のファームウェアから起動する。

以上の手順で SD のファームウェアを 1 台ずつ書き換えた。エレクトロニクスが配備されている SD は 87 台であるが、そのうち 3 台は通信状態が悪くタワー PC からファームウェアを送ることができなかった。結果的に通信に UDP を使用するファームウェアに書き換えることができた SD は全部で 84 台であった。SD84 台のファームウェアの書き換えが完了した 2017 年 7 月 26 日より UDP を使用した通信による TALE 実験 SD アレイの稼働を開始した。2018 年 2 月現在での TALE 実験 SD アレイにおける各 SD のエレクトロニクスファームウェアの状態については図 6.5 で示す。

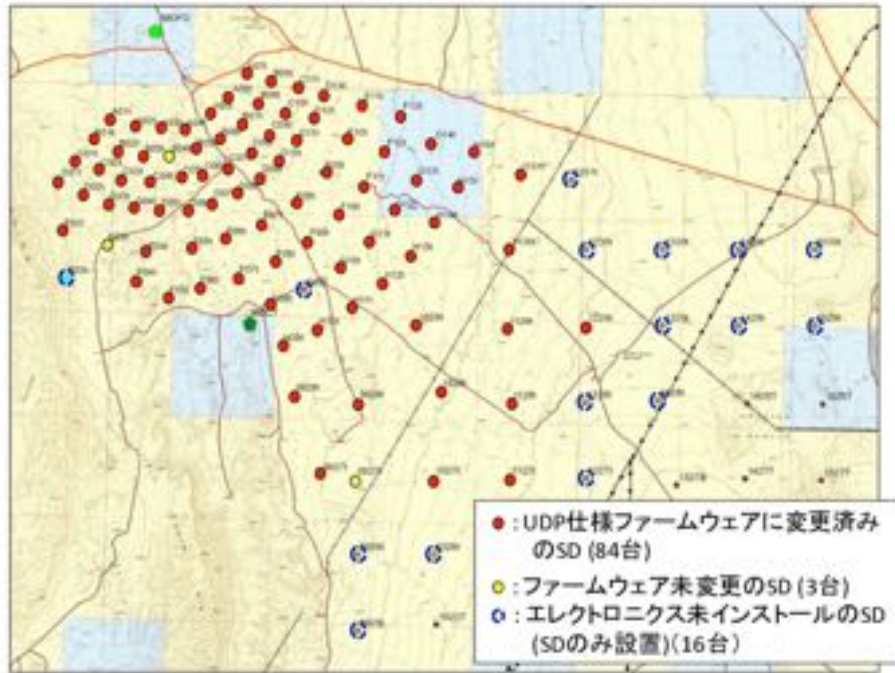
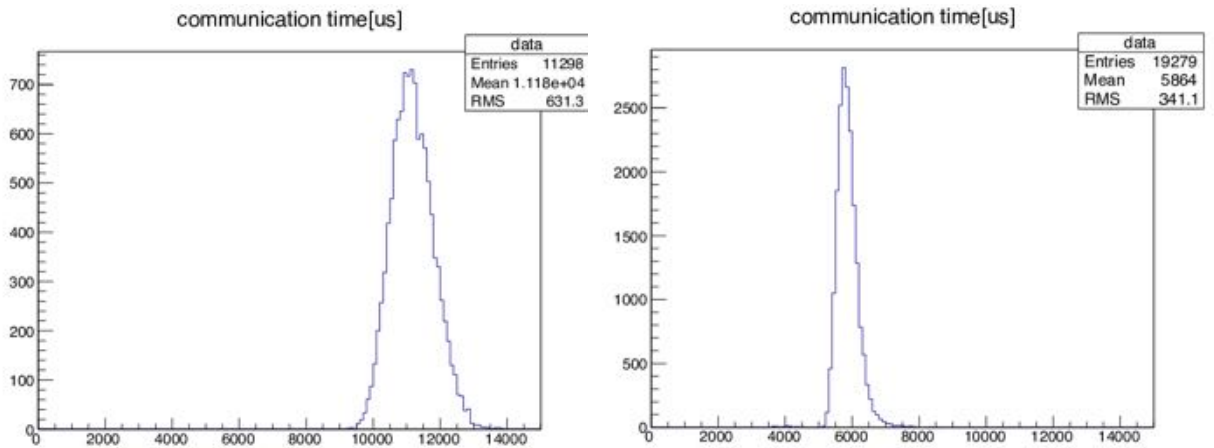


図 6.5: 各 SD のファームウェアの状態を示すマップ (2018 年 2 月現在)

6.3.5 タワー PC が SD1 台あたりの通信に要する時間

通信プロトコルとして TCP、UDP を使用するソフトウェアをそれぞれ使用して DAQ を実行し、SD1 台あたりの通信に要する時間を測定した。ここで SD1 台あたりの通信に要する時間というのは 5.2.4 節で述べたように、タワー PC が記録している「レベル 1 トリガーテーブルとモニターデータの取得を開始した時刻」と「全 SD からの取得を完了した時刻」から「全 SD からレベル 1 トリガーテーブルとモニターデータを取得するのに要した時間」を計算し、それを通信している SD の台数で割ることで計算している。使用した SD の台数は TCP が 55 台、UDP が 84 台である。また、トリガーテーブルを回収する際に SD1 台でも通信エラーが起こるとタイムアウトを判定するための 30 ミリ秒が余分にかかってしまうので、今回はタワー PC と SD 間の通信に要する純粋な時間を計算するために、すべての SD との通信でエラーが生じていないサイクルのデータのみを計算に使用した。その結果が図 6.6 であり、TCP が平均 11.2 ミリ秒、UDP が平均 5.9 ミリ秒であり、UDP の方が TCP に比べ約半分程度の時間で通信できることがわかった。このときのヒストグラムは図 6.6 である。DAQ サイクルの 1 サイクルでアレイ内の全 SD からレベル 1 トリガーテーブルおよびモニターデータを取得するのに使える時間は 1 秒のうちのおよそ 800 ミリ秒である。よって、通信に UDP を使用すれば単純計算で最大 SD135 台との通信が可能であることがわかった。この通信速度であれば、TALE 実験 SD の全 103 台との通信には十分であると判断した。



(1)TCP を使用した場合の通信時間

(2)UCP を使用した場合の通信時間

図 6.6: SD1 台と通信するのに要した時間のヒストグラム。横軸は μ s 単位。

6.4 TALE 実験 SD の運用とその性能

6.4.1 DAQ の開始と停止

リブートタイマー

TALE 実験 SD にはそれぞれ「リブートタイマー」という装置が設置されている。リブートタイマーとはその名の通り、SD をリブートさせるための装置であり、タイマー式で1週間に1度強制的に作動するようになっている。SD をリブートさせるための方法としては2つあり、1つ目はエレクトロニクスに備わっているリブートボタンを押す方法、2つ目はタワー PC からユーザーコマンド“4400”を送信する方法である。しかし1つ目の方法は実際に人間が現地の SD までアクセスする必要がある、2つ目の方法は SD がハングアップ等の理由で通信できない状態であると実行できない、という問題点がある。そのため、SD の状態に依らず定期的にはリブートをかけるための手段としてリブートタイマーが導入された。SD のエレクトロニクスはバッテリーからの給電によって起動しているが、リブートタイマーはその間に挿入する。実際に TALE 実験 SD に装備されたリブートタイマーの外観と、その配線についてそれぞれ図 6.7 と 6.8 に示す。



図 6.7: TALE 実験 SD のバッテリー部分に装備されたリブートタイマー

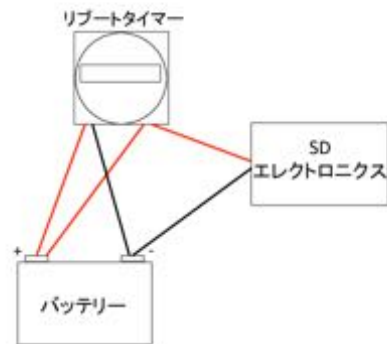


図 6.8: リポートタイマーの配線

1週間に一度SDエレクトロニクスへの+12Vの供給をグラウンドレベルに落とすことで強制的にリブートをかける

DAQの開始と停止の手順

SDはトリガーデータ送信要求などのユーザーコマンドを受信したとき、自身のロジカルIDが与えられていなければコマンドに対する応答をしないので、SDに対してはまずユーザーコマンド“4000”によってロジカルIDを与える必要がある。また、DAQを実行する前に各SDがPMTに出力する電圧値をタワーPCから与える必要があり、これにはユーザーコマンド“4700”を使用する。リポートタイマーが作動するとSDはリブートがかかり、与えられたロジカルIDやPMTに出力する電圧値に関するデータが消えてしまう。そのため、DAQの実行途中であっても、リブートタイマーが作動するとSDとの通信は必ず失敗してしまうので、一度DAQを停止して、ユーザーコマンド“4000”と“4700”を送った後にDAQを再開させる必要がある。リブートタイマーは

1 週間に一度作動するので、1 週間に一度のペースでこの作業を実行する。以下に、DAQ の停止と再開の手順を示す。この作業は手動で行う。

1. “ctrl+c” で DAQ を停止する。
2. `./setup_udp1.sh`、`./setup_udp2.sh`、`./setup_udp3.sh`、`./setup_udp4.sh` を実行する。
 - `./setup_udp1.sh` から `./setup_udp4.sh` のスクリプトを順に実行することでユーザーコマンド “4000” と “4700” が各 SD へと送信される。これらのユーザーコマンドの送信によって SD にロジカル ID と PMT に印加する電圧値を与える。ユーザーコマンド “4000” に対して SD が正常な応答をした場合はタワー PC のモニター上にその SD の動作しているファームウェアのバージョンが表示される。もし SD がタワー PC からのコマンドを受信できていない、もしくは正常に処理をできていない等の理由でタワー PC が SD からの応答を受けることができない場合は SD のファームウェアのバージョンが表示されないので、その SD は応答のない SD だと判断することができる。
3. 応答のない SD に対して個別に ping を試行してネットワークに接続できていないことを確認し、通信のできない SD を決定する。
4. DAQ に参加させる SD のリストとして `liveiplist“日付”.dat` ファイルを作成する。
 - このファイルには DAQ に参加させる SD の IP アドレスをスペースを空けて全て記入する。全ての SD の IP アドレスが書かれた “`liveiplistall.dat`” ファイルを事前に作成しており、通常はそのファイルをコピーして応答のない SD の IP アドレスをそこから削除することによってファイルを作成する。
5. `$sudo ./daqu liveiplist“日付”.dat “データ保存場所”` を実行する。
 - 「データの保存場所」は通常 `/Desktop/DATA/` を指定する。保存場所をこのように指定する理由は 6.4.3 節の「`HOST PC` におけるデータの保存場所」の項で述べる。

6.4.2 SD の GPS と位置測定

SD のエレクトロニクスには時刻情報の取得のために GPS モジュールが取り付けられている。エレクトロニクスから GPS に対してシリアル通信でコマンドを送ることができる。GPS の動作モードには大きく分けて “3D-Fix モード” と “位置固定モード (以下 PH モード)” がある。“3D-Fix モード” は常に GPS 衛星からの信号によって位置情報を修正・更新しながら動作するモードであり、“PH モード” はある座標に位置を固定して動作するモードである。

TA 実験 SD アレイでは SD エレクトロニクスの GPS を “PH モード” にして運用しており、TALE 実験 SD でもこれに倣い “PH モード” で運用することにした。GPS に対して任意の座標を与えて “PH モード” で動作させるには、タワー PC からユーザーコマンド “4100” を送信する。ただし、このときに与える座標は正確な SD の位置である必要があり、その座標を測定しておく必要がある。これにはユーザーコマンド “4200” を使用する。このコマンドを SD に与えると、GPS モジュールは “3D-Fix モード” で動作して毎秒エレクトロニクスに対して座標を送信する。エレクトロニクスは 24 時間分の座標の統計データを解析し、自動的にその平均値を GPS モジュールに送信することで “PH モード” で動作するようになる。4.2.3 で述べたようにユーザーコマンド “4200” にはパラメーターとして “new” や “old” を与える必要がある。“new” を与えた場合は座標測定後にその測定

結果をもとにして“PHモード”で動作し、“old”を与えた場合は座標測定後にその測定データを使用せずに位置測定前に動作していた座標によって“PHモード”で動作する。

タワーPCからユーザーコマンド“2200”を与えられたSDが座標を24時間かけて測定した結果の統計データを、タワーPCが取得するにはユーザーコマンド“2300”を使用する。“2300”によってエレクトロニクスから得られるデータは大きく分けて2つのデータから構成されており、1つは5分ごとの位置情報を24時間分リストにしたもの、もう1つは位置情報を緯度・経度・高度についてそれぞれ度数分布表にしたものである。位置情報は緯度と経度はmas(1秒の1000分の1の角度)単位で、高度はcm単位で得られる。例として、DET5401についてユーザーコマンド“2300”で取得した位置データをヒストグラムにしたものを示す。図6.9、図6.10、図6.11はそれぞれ緯度、経度、標高である。RMSは緯度について38.31masであり、緯度について29.39mas、標高について239.5cmであった。RMSが40masの場合、masは1000分の1秒の角度であるので、度に換算すると 1.1×10^{-5} 度である。これを地球の赤道面1周を4万kmとして距離に換算すると、 $40000 \times 10^3 \times \frac{1.1 \times 10^{-5}}{360} = 1.2\text{m}$ である。よってRMSは緯度経度について1.2m以内、標高について2.4mとなる。2.4mを光速で割ると8nsであり、この値はエレクトロニクスのFADCのサンプリングレートである20nsの半分以下である。よってGPSの位置測定は正常に行うことができていると判断し、この測定で得られた位置データの平均値をSDの位置として“PHモード”で動作させている。

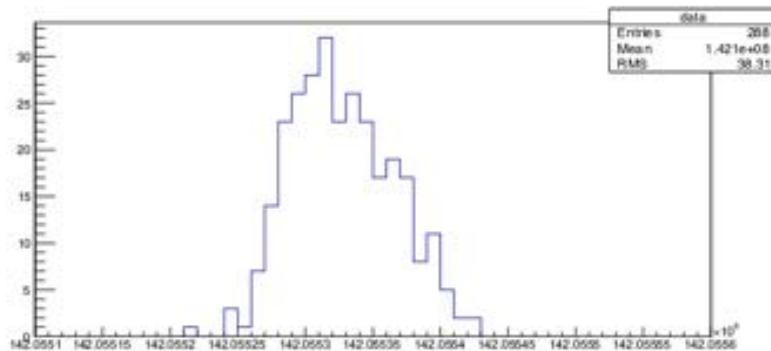


図 6.9: DET5401 の GPS による位置測定結果のヒストグラム (緯度)。横軸は mas 単位 (1 秒の 1000 分の 1 の角度)、1bin は 10mas である。

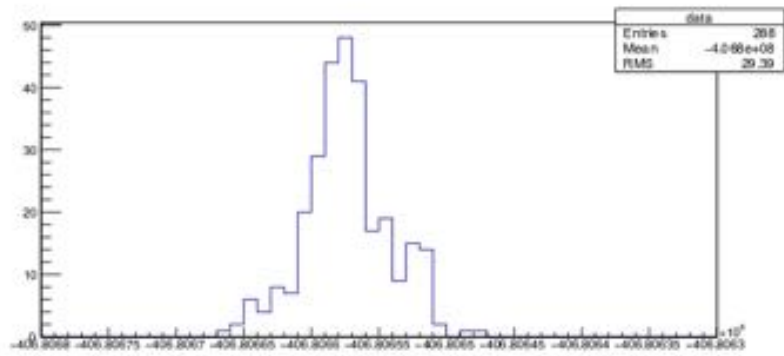


図 6.10: DET5401 の GPS による位置測定結果のヒストグラム (経度)。横軸は mas 単位 (1 秒の 1000 分の 1 の角度)、1bin は 10mas である。

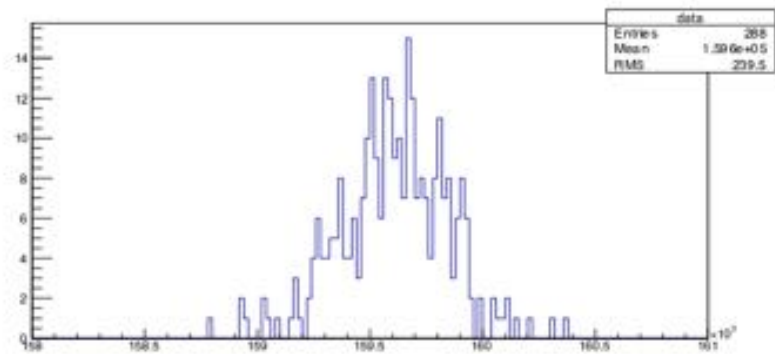


図 6.11: DET5401 の GPS による位置測定結果のヒストグラム (標高)。横軸は cm 単位、1bin は 20cm である。

6.4.3 取得データの転送

タワー PC における取得データの保存場所

タワー PC は DAQ ソフトウェアを実行すると、SD からデータ収集を行いそのデータファイルを作成する。ラズベリーパイは microSD カードに OS を入れて動作しており、外部メモリとして USB2.0 ポートがある。そのためデータの保存場所としては microSD と USB メモリの 2 通りがある。

USB メモリをデータの保存場所とした場合に、800 ミリ秒の時間内に SD のトリガーデータを集めきれずにタイムアウトしてしまうという問題が生じた。この問題は microSD を保存場所とした場合には生じなかったため、USB 固有の問題であると思われる。USB メモリを保存場所とした場合、DAQ ソフトウェアは USB 内にデータファイルを作成し、DAQ で取得したデータを“fprintf 関数”によって書き出していく。この USB メモリへの書き出しの際に時間がかかってしまうことによって、この問題が生じると思われる。以上の理由により、DAQ ソフトウェアによって作成するデータの保存場所は microSD にしている。

データのバックアップと転送

タワー PC のメモリの容量は microSD が 32GB、USB メモリが 32GB である。microSD には OS や DAQ ソフトウェアが入っているため、microSD 内で DAQ データを保存できる容量はせいぜい 30GB 程度である。また DAQ による生データは典型的に SD84 台による 1 時間分のデータだと約 13MB であり、1 日分だと 312MB 程度になる。

microSD と USB メモリの空き容量をすべて DAQ データの保管に使用したとしても合計 62GB であり、単純に計算すると DAQ データ約 200 日分にしかならない。またタワー PC のみにデータを保存していた場合、何らかのアクシデントによりデータが消失してしまう可能性がある。そのためタワー PC からデータを外部 PC へと転送してデータのバックアップをとっている。データのバックアップは 2 箇所にとっており、1 つはデルタ市にある CosmicRayCenter に設置している PC(以下 CRCPC) であり、もう 1 つは東京大学宇宙線研究所の PC(以下 ICRRPC) である。

CRCPC への転送は“rsync”と“crontab”を使用することで自動的に実行される。rsync は linux のコマンドで、リモートの PC 間でディレクトリの同期をするものである。DAQ データはタワー PC の /Desktop/DATA/ に保存されているので、このディレクトリに対して rsync が行われる。この CRCPC の rsync は crontab を使用することで 1 日に 2 度自動的に実行される。cron はジョブを決められたスケジュールに従って自動的に実行させるデーモンプロセスであり、crontab は cron の設定をするためのファイルである。

CRCPC から ICRRPC への転送はタワー PC から CRCPC への crontab を使った自動転送でなく、手動で行う。タワー PC から CRCPC に転送されたデータを数日分(典型的には 10 日分)まとめて tar ファイルに圧縮し、それを ICRRPC へと転送する。タワー PC に保存されている DAQ データは 2 箇所の PC への転送が完了次第削除される。

6.4.4 モニターデータの作成

TALE 実験 SD の DAQ は、1 週間に 1 度リブートタイマーが作動するので、その都度 DAQ の停止と再開をしている。その 1 週間の RUN ごとにモニターデータを作成している。モニターデータは 2 種類作成している。

1つ目は TALE 実験 SD アレイ全体の稼働状況を示したものである。例として図 6.12 に典型的なモニターデータを示す。この例は 1 月 4 日の 0 時から 1 月 7 日 0 時までの 3 日間分のデータであり、1 月 4 日の 0 時より前にリブートタイマーが作動し 1 月 4 日の 3 時頃に DAQ の停止と再開を行っている。このモニターデータの各グラフについて一番上から順に説明する。

1. 10 分あたりの DAQ サイクル数

- DAQ サイクルは 1 秒で 1 サイクルであるので、通常であれば 10 分あたりの DAQ サイクル数は 600 回である。この例では 1 月 4 日の 3 時頃に一度 DAQ を停止してから再開しているため、その時間の DAQ サイクル数は 600 回よりも少なくなっている。

2. 通信している SD の数

- タワー PC が通信できている SD の数を示している。この例では DAQ 再開後の SD 数は常に 80 程度で安定していることがわかる。リブートタイマーが作動すると SD はタワー PC と通信ができなくなるので、この値はその SD の数の分減少する。リブートタイマー作動後から DAQ の停止と再開までにタワー PC と通信ができている SD が 10 数台存在するが、これらの SD は 2013 年に設置されてから 2017 年 2 月まで TA 実験と同じシステムによって SD アレイとして動作していた SD である。これらはリブートタイマーが配備されておらず 1 週間に 1 度のリブートがなされないためこの期間でもタワー PC と通信ができている。モニターデータ上で通信台数が急に数十台減少するといった現象が現在までに数回生じており、その事象は天候不良によりソーラーパネルからの給電が落ちてバッテリー電圧が低下することで SD がリブートしていたことが原因だと判明している。

3. 10 分あたりのレベル 2 トリガー数

- タワー PC が発行した 10 分あたりのレベル 2 トリガー数を示す。典型的なこの値と一つ下のグラフの「10 分あたりのレベル 1 トリガー数」が常に 0 であるような場合は SD に対してユーザーコマンド “4700” (PMT に出力する電圧の設定をする) が正常に送信できていない可能性がある。

4. 10 分あたりのレベル 1 トリガー数の SD1 台あたりの平均値

- SD1 台あたりの典型的なレベル 1 トリガー数は 10-30 の範囲である。この範囲を外れている場合は、各 SD の PMT に出力する電圧値を調整することで対処する。その際は SD 個別の状態を示すモニターデータの MIP のグラフを参照する。

5. 10 分あたりのリトライ通信数

- TALE 実験 SD アレイではリトライ通信を実装していない。そのため、このグラフは TALE 実験 SD アレイでは意味を持たない。

6. 10 分あたりのタイムオーバー数

- タイムオーバーとはレベル 1 トリガーデータ収集のために用意されている時間である 800 ミリ秒以内に全ての SD からのデータ収集が完了しなかった場合を指す。リブートタイマーが作動後、DAQ を停止し再開するまでの間にこのタイムオーバーは常に 600 になっており、全てのサイクルでタイムオーバーになっていることを示している。こ

れはSD がリブートによってタワー PC と通信不可能になったことで、SD1 台との通信毎にタイムアウト時間である 30 ミリ秒がかかってしまい、結果的に 800 ミリ秒以内に SD 全台との通信が完了しないためである。

2 つ目は個々の SD 単体の稼働状況を示したものである。図 6.13 に典型的な例として DET5401 のモニターデータを示す。このモニターデータの示している期間は 1 つ目の TALE 実験 SD アレイ全体の稼働状況を示したものと同じである。このモニターデータの各グラフについて一番上から順に説明する。

1. GPS モジュールが補足している GPS 衛星数

- エレクトロニクスには GPS を備え付けられており、その GPS から時間情報と位置情報を取得している。この捕捉している GPS 衛星数の典型的な値は 7-10 程度である。この程度の GPS 衛星が捕捉できていれば SD アレイの運用に問題無い精度が得られる。この値が常に 0 になっている SD は GPS 衛星を全く捕捉できておらず、レベル 1 トリガーデータに含まれる GPS タイムスタンプがタワー PC や他の SD とずれており、その SD からのトリガーデータはタワー PC のレベル 2 トリガー判定に使用することができない。このような SD に対しては、ユーザーコマンド “2000” を送ることで、その GPS モジュールの状態を確認することができ、対処としては、GPS モジュールの交換もしくは GPS アンテナの交換を行うことになる。また、基本的には GPS 衛星を捕捉できているものの、ある一定期間にだけこの値が 0 になるような SD も存在する。値が 0 になる時間帯に周期的な特性が確認されており、これについては GPS モジュールと GPS アンテナに対してバッテリーから供給される電圧値や電流値が時間帯によって変動するのでその影響によるものだと考えている。

2. 10 分あたりの通信エラー数

- ここでの通信エラー数とはレベル 1 トリガーデータ収集の初回通信 (6.4.5 に記述) における通信エラー数を指す。この値が大きいとその SD の通信環境が不安定であることがわかる。ここで示される値はあくまで初回通信のエラー数であり、そのデータのリカバリー通信による再収集の成功か失敗かは反映されないためこのモニターデータからは判別できない。モニターデータにおける今後の改良点としてリカバリー通信の試行回数とエラーを盛り込むことが求められる。

3. 各種電流・電圧値

- バッテリーとソーラーパネルの電圧値を見ることで、SD への電源供給状況を確認することができる。バッテリーの電圧は日中に上昇し、夕方に下降する。天候不良によりソーラーパネルからの給電が落ちると、バッテリー電圧の上昇している期間が短くなる。TALE 実験 SD アレイ全体の稼働状況を示すモニターデータの「通信している SD の数」において天候不良によるバッテリー電圧の低下で SD がリブートしたと述べたのは、この「各種電流・電圧値」を見ての判断である。

4. 各種温度

- SD とエレクトロニクスの温度を確認することができる。

5. ペDESTAL とその標準偏差

- SD のシンチレータの上層と下層の信号に対応する CH1、CH2 のそれぞれのペDESTAL と標準偏差を確認することができる。ペDESTAL の典型値は 5 程度であり、その標準偏差は 1 以下である。このグラフの枠内にペDESTAL や標準偏差が見えていない場合はエレクトロニクス内で信号の処理が正常に行なわれていない可能性がある。この場合はその SD にユーザーコマンド “4400” を送りリブートする。

6. MIP ピーク

- CH1、CH2 のそれぞれの 1MIP ピークを示す。この値は 40-50 あたりが典型値であり、この値から外れている場合は、PMT に印加する電圧値を調整する必要がある。

7. トリガーレート

- レベル 0 トリガーレートとレベル 1 トリガーレートを示す。レベル 0 トリガーレートは典型的に 700 から 800 程度であり、レベル 1 トリガーレートは 10-30 程度である。この範囲から外れている場合は、PMT に印加する電圧値を調整する必要がある。また、この値がどちらも 0 であるような SD は、PMT からの信号が全くないと思われ、PMT もしくは関連するケーブルやコネクタ周りに異常があると考えられる。

以上のように 2 種類のモニターデータを使用することで TALE 実験 SD アレイの安定動作の検証をしている。2018 年 2 月現在の TALE 実験 SD アレイの各 SD の状態について表したマップを図 6.14 に示す。

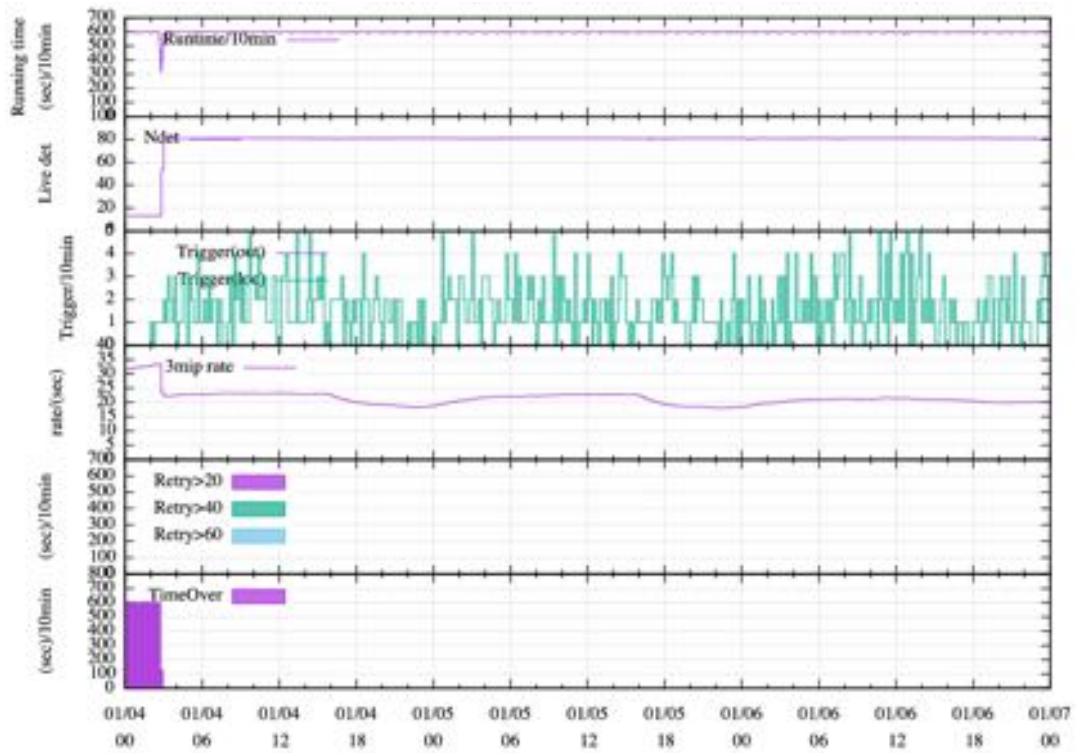


図 6.12: TALE 実験 SD 全体の稼働状況を示すモニターデータ。上から、10 分あたりの DAQ サイクル数、通信している SD の数、10 分あたりのレベル 2 トリガー数、SD1 台あたりの平均レベル 1 トリガー数、リトライ通信数 (TALE では実施しておらず意味は無い)、10 分あたりのタイムオーバー数

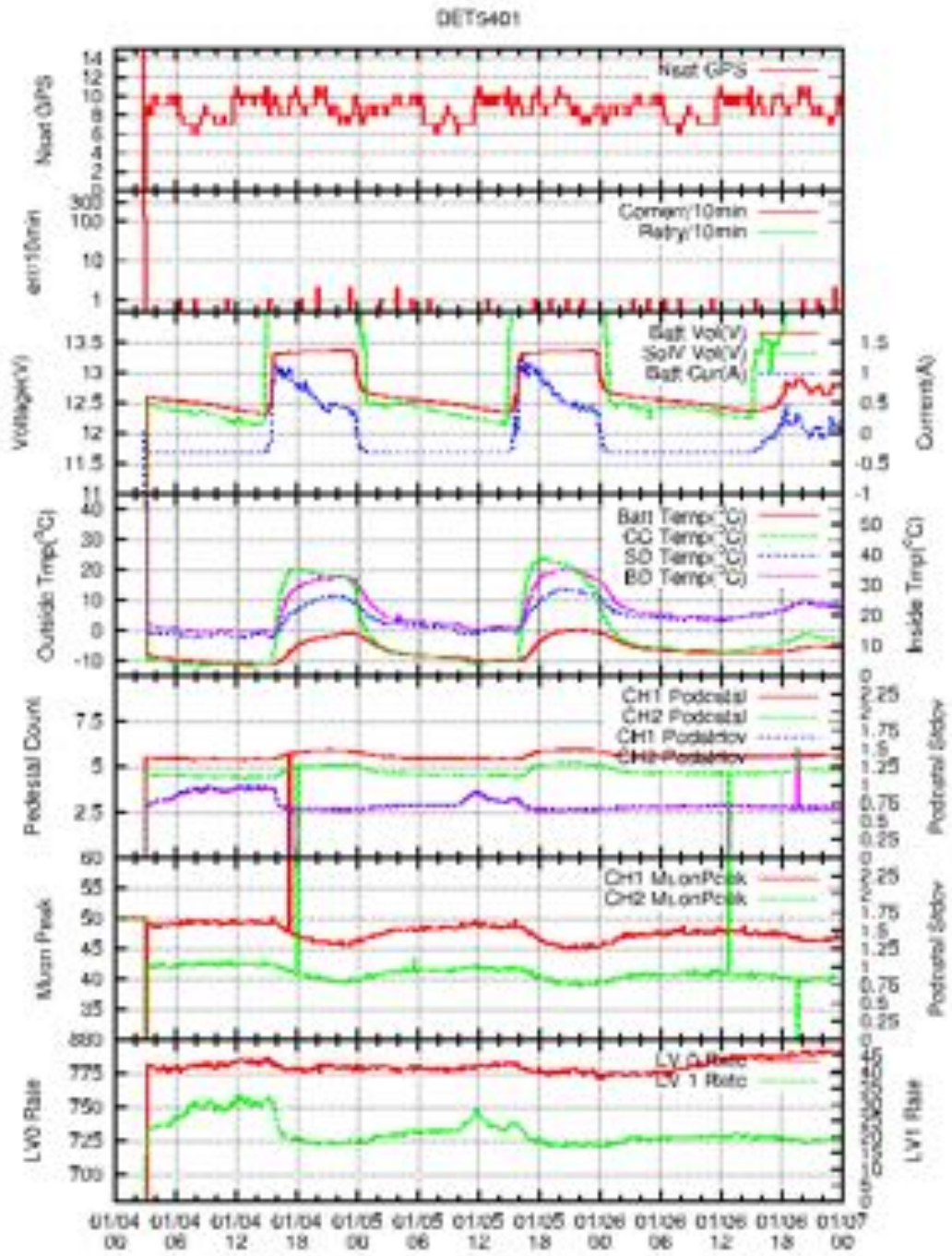


図 6.13: DET5401 のモニターデータ。上から、通信できている GPS 衛星数と GPS の状態、10 分間の通信エラー数とリトライ通信数、各種電流・電圧、各種温度、ペDESTAL とその標準偏差、1 MIP ピーク、トリガーレートを表す。

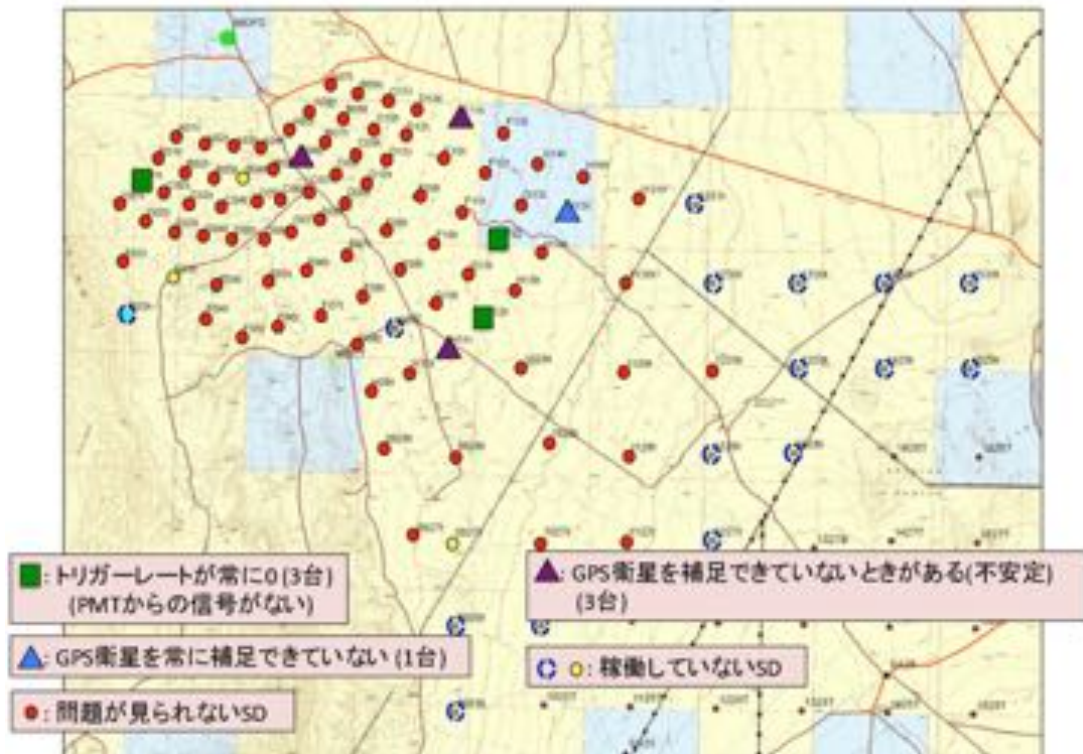


図 6.14: 2018 年 2 月現在の TALE 実験 SD アレイにおける各 SD の状態を示すマップ

6.4.5 通信エラーレート

TALE 実験 SD のタワー PC には 5.2.5 節で述べたように、通信エラーレートを減らすためのシステムとしてリカバリ通信を実装している。リカバリ通信の流れについては図 6.15 に示す。

SD に対してある秒番号のトリガーデータを収集する 1 度目の通信を、ここでは便宜上初回通信と呼ぶことにする。リカバリ通信の導入によって起こりうる通信の成功と失敗のパターンとしては図 6.15 で示した 3 つが考えられる。1 つ目は初回通信でトリガーデータの回収に成功する図 6.15 の上段、2 つ目は初回通信に失敗しリカバリ通信で成功する図 6.15 の中段、3 つ目は初回通信とリカバリ通信の両方で失敗する図 6.15 の下段のパターンである。3 つ目のように初回通信とリカバリ通信の両方で失敗した場合、そのトリガー情報は完全に失われ、レベル 2 トリガー判定には使用されないことになる。

この各パターンがそれぞれどの程度のレートで起こるのか、TALE 実験 SD のデータを使用して調べた。使用データは SD84 台を使用した際の 1 時間分のデータである。この結果が図 6.1 である。各 SD に対するトリガーデータ収集は 1 秒に 1 度であるので、初回通信試行回数は $3600 \times 84 = 302400$ 回である。このうち 456 回が通信失敗に終わったため、初回通信のエラーレートは 0.15% である。初回通信に失敗した 456 回分のトリガーデータはリカバリ通信で再収集の試行がなされ、そのうち成功したのが 424 回であり、失敗したのが 32 回であった。そのためリカバリ通信の成功率は 93% と計算できる。またリカバリ通信でも収集に失敗した 32 回分のトリガーデータはその後再収集されることはないので完全に損失してしまうデータであり、その損出率は $(32 \div 302400) \times 100 = 0.011\%$

となる。これをSD1台分に換算するためにSDの台数である84台で割ると、SD1台あたりのデータ損出率は0.00013%となる。

リカバリー通信を実装していない場合だと、初回通信に失敗したデータがそのまま損出してしまふのでトリガーデータ損出率は初回通信失敗率と等しく0.15%となる。リカバリー通信の実装によるトリガーデータの損出率は0.011%であるので、実装していない場合と比べてトリガーデータ損出率を10分の1以下に減少させることができた。

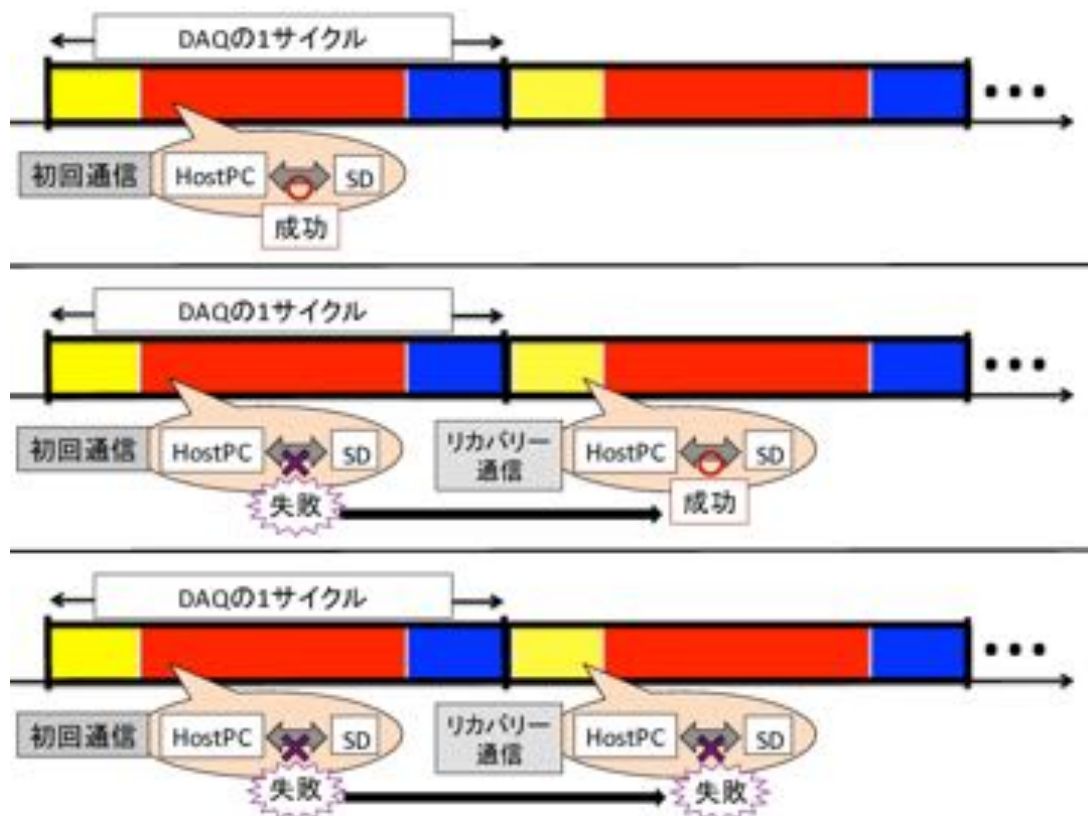


図 6.15: 初回通信とリカバリー通信の流れ

項目	数値
初回通信試行回数	302400
初回通信失敗回数	456
無線通信速度	424
リカバリー通信成功回数	32
リカバリー通信失敗回数	0.15%
リカバリー通信成功率	93%
トリガーデータ損出率	0.011
トリガーデータ損出率 (SD1台あたり)	0.00013

表 6.1: TALE 実験 SD1 時間分のデータにおけるエラーレート

6.4.6 TALE 実験 SD アレイの空気シャワーイベント数

レベル 2 トリガー条件の変更

2.5.5 節で述べたように、TA 実験 SD アレイのレベル 2 トリガーは「 $8\mu\text{s}$ のゲート幅内に 3 台以上の隣接する SD がレベル 1 トリガーを示している」という条件を課している。しかし TALE 実験 SD アレイは TA 実験 SD アレイのように SD の配置がほぼ等間隔で正方形の格子状でない上、各 SD の間隔自体一定でない。そのため隣接という条件をトリガー条件に使用するのは良いことではない。そこで TALE 実験 SD アレイではコインシデンスの条件に隣接は使用せず、SD の位置によらない条件を設定することにした。ただし隣接の条件を外し、そのまま 3 台の SD によるコインシデンスではあまりにも条件としては緩くなってしまうので、代わりにコインシデンスの台数を 5 台に増やした。その結果、最終的な TALE 実験 SD アレイのレベル 2 トリガーは「 $8\mu\text{s}$ のゲート幅内に 5 台以上の SD がレベル 1 トリガーを示している」という条件に設定した。

レベル 2 トリガーレート

上述の TALE 実験 SD アレイ用に設定した条件で DAQ を行い、1 月 4 日 0 時から 3 日分のデータで 1 時間あたりのレベル 2 トリガー数の時間変動をプロットしたのが図 6.16 である。また、209 時間分のデータを使用して 1 時間あたりのレベル 2 トリガー数をヒストグラムにしたものが図 6.17 である。この結果から 1 時間あたりの平均レベル 2 トリガー数は 10 回であった。TALE 実験 SD アレイが 24 時間 365 日稼働したとすると、年間 87,600 個程度のイベントトリガーが期待できる。

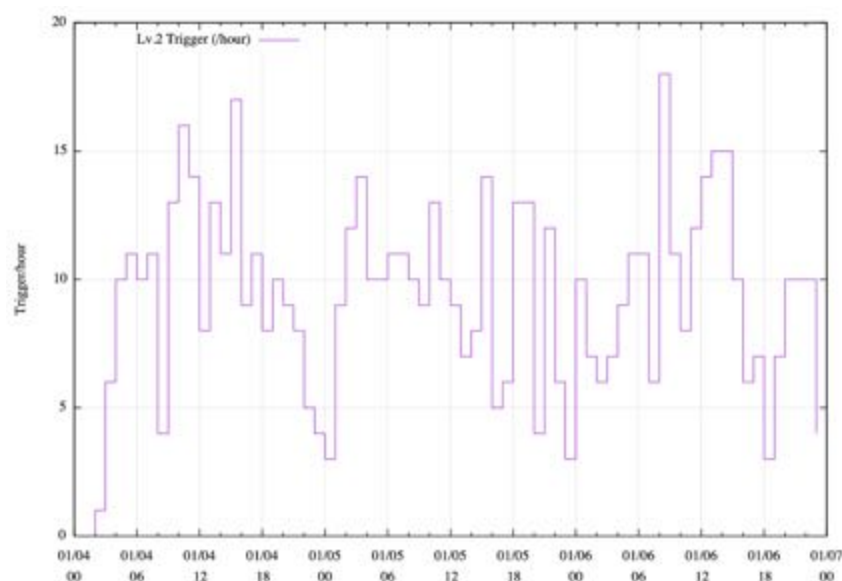


図 6.16: TALE 実験 SD における 1 時間あたりのレベル 2 トリガー数の時間変動

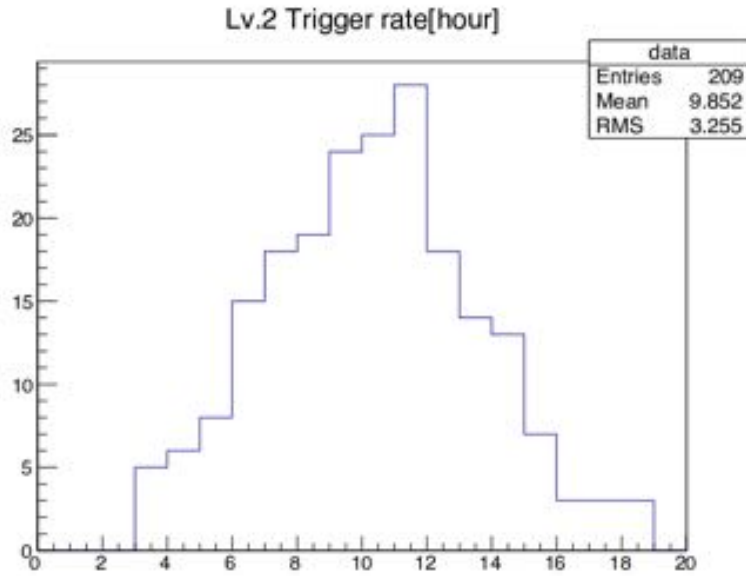


図 6.17: TALE 実験 SD における 1 時間あたりのレベル 2 トリガー数のヒストグラム

モンテカルロシミュレーションとの比較

TALE 実験 SD 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 [28][29]。ただし、このシミュレーションでは SD アレイのレベル 2 トリガー判定を TA 実験 SD アレイと同じ「 $8\mu\text{s}$ のゲート幅内に 3 台以上の隣接する SD がレベル 1 トリガーを示している」という条件で行った結果である。そのため現在の TALE 実験 SD アレイとはトリガー条件が異なることを留意しておく必要がある。このシミュレーションで計算された TALE 実験 SD アレイで期待されるイベントレートスペクトラムを図 6.18 に示す。また、SD アレイの最頻エネルギーは $10^{16.5}$ eV で、トリガー頻度は年間約 50,000 イベントと予想されている。前節より実際の TALE 実験 SD アレイではレベル 2 トリガーが年間約 90,000 イベントと見積もられ、この値はシミュレーションの結果の 2 倍程度の値である。しかし、シミュレーションと現在の TALE 実験 SD アレイではトリガー条件が異なるので、現在の TALE 実験 SD アレイのトリガーレートは妥当で、レベル 2 トリガーで得られるデータの多くは空気シャワーイベントだろうと思われる。

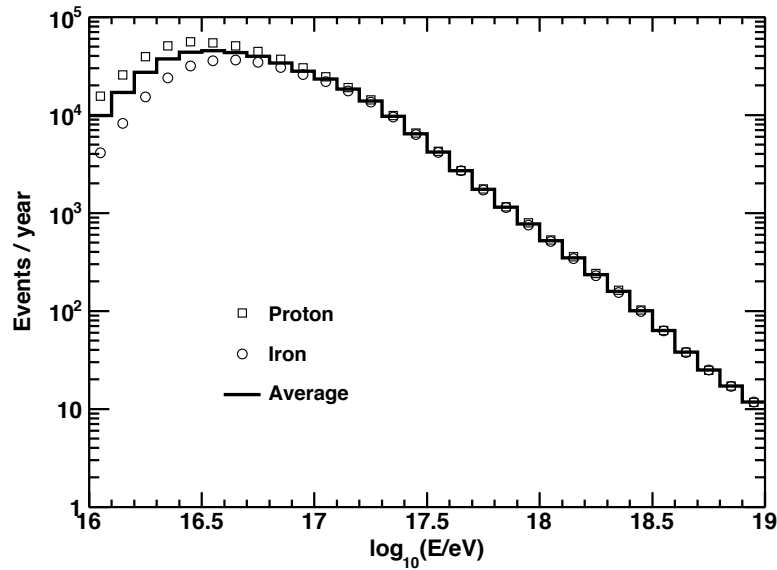


図 6.18: モンテカルロシミュレーションで計算された、TALE 実験 SD アレイによる観測で 1 年間に期待される一次粒子が陽子の空気シャワー (□) と鉄の空気シャワー (○) に対するトリガー数のスペクトル。Average はエネルギービン毎の陽子と鉄のプロットの平均を示している。最頻エネルギーは $10^{16.5}$ eV で、年間約 50,000 事象のイベントトリガーが期待される。

レベル 2 トリガー イベント例

TALE 実験 SD アレイによるレベル 2 トリガー イベントの例を示す。例として示すイベントは TALE 実験 SD アレイで 11 月 23 日 19 時 9 分 3 秒のものであり、以下で時系列に沿って述べる。

1. 19:09:04 にタワー PC が全 SD から 19:09:03 のレベル 1 トリガーを回収する。
2. 19:09:05 にタワー PC が収集したレベル 1 トリガーからレベル 2 トリガーを判定する。この結果、図 6.19 左の SD5 台でコインシデンスがかかり、レベル 2 トリガーを各 SD へと発行する。
3. タワー PC からのレベル 2 トリガー発行を受けて、各 SD はそのトリガー時刻にレベル 0 トリガーによる波形がないかを探索する。
4. 19:09:06 にタワー PC がレベル 1 トリガーを全 SD から収集する際に、レベル 2 トリガーに対する波形を持っている SD からはその波形数が送信される。
5. タワー PC はその情報を元に、各 SD から波形データを収集する。この時波形データを収集した SD が図 6.19 右の SD12 台である。

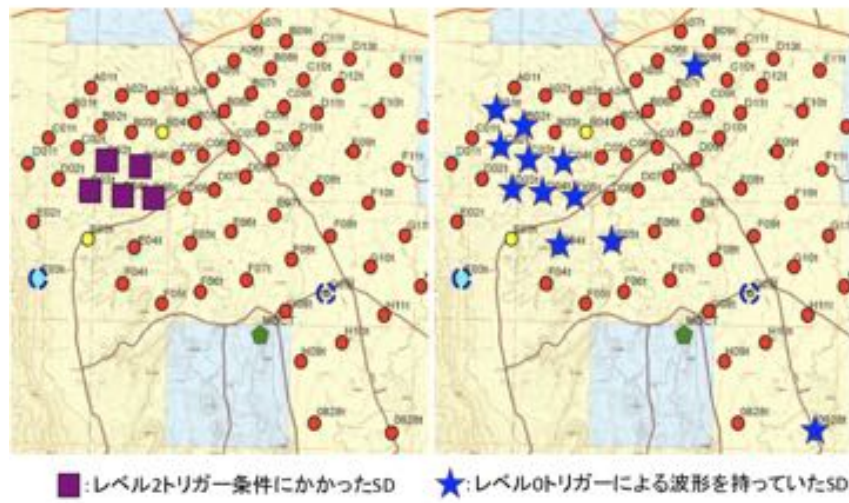


図 6.19: 左図 レベル 2 トリガーのコインシデンス条件に使用された SD、右図 レベル 2 トリガー時刻に波形を持っていた SD

タワー PC が収集した波形データを時間に沿ってプロットしたのが図 6.20 である。このうち、時間的に離れている DET5805 と、空間的に離れている DET5508 と DET0928 を除いて再度プロットしたのが図 6.21 である。この図左のマップと図右の波形データについて数字とその色は同じ SD に対応している。

この例から TALE 実験 SD アレイにおいてタワー PC によるレベル 1 トリガーの収集、レベル 2 トリガーの判定、トリガー時刻における波形データの収集が正常に行われていることがわかる。

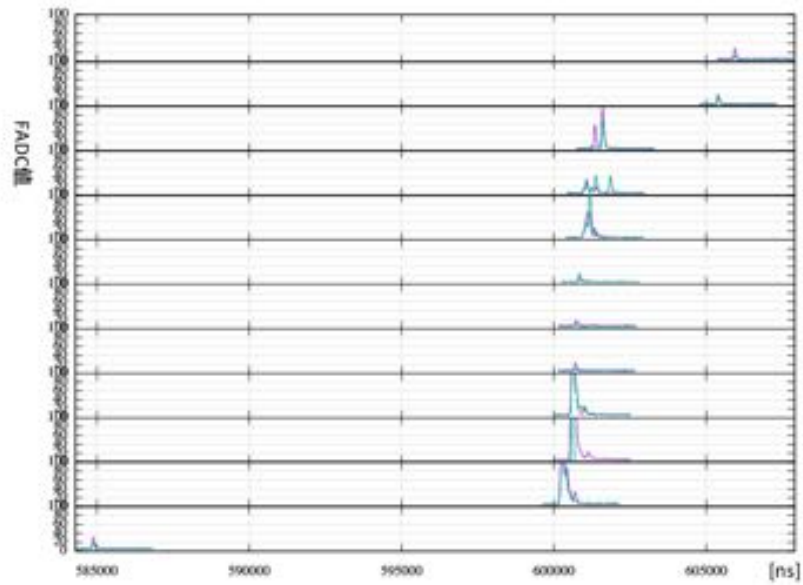


図 6.20: イベントに対する SD12 台の波形データ。横軸は時間で単位は ns。縦軸は各 SD の FADC 値。SD はシンチレータが 2 層あるので上層と下層の PMT からの信号をそれぞれ紫と緑で表している。

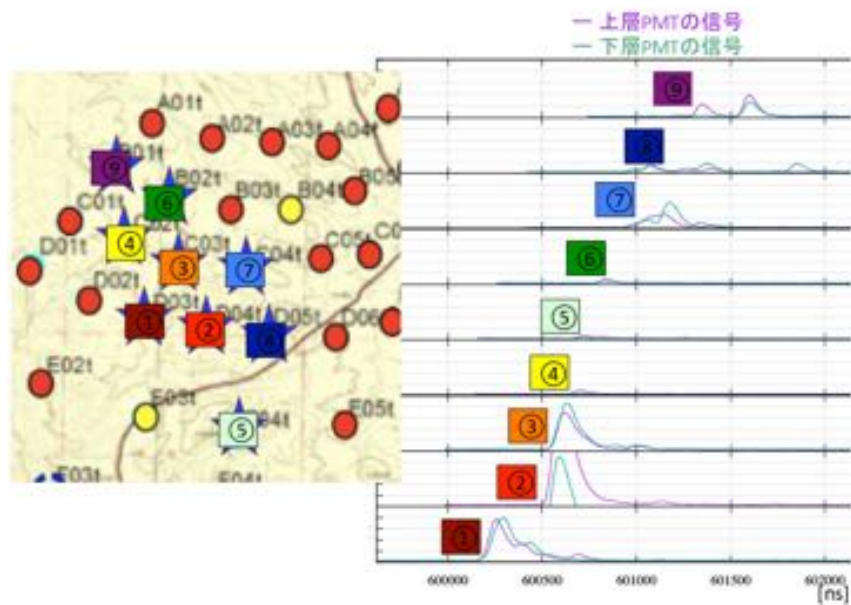


図 6.21: イベントに対する SD9 台の波形データ。左のマップと右の波形における数字とその色は同じ SD を示す。

6.4.7 ハイブリッドトリガー

TA 実験では3基のFDステーションがあり、TA 実験SDアレイにおける空気シャワートリガーは、SDアレイによるレベル1トリガーから判定するレベル2トリガーに加えて、FDからの外部トリガーによるハイブリッドトリガーがある。TALE 実験でも TALE 実験FDが稼働しており、TALE 実験SDアレイにおいてもそのFDから外部トリガーを受け取りSDアレイから波形を収集するシステムを実装する必要がある。現在このハイブリッドトリガーの開発が進行中である。ハイブリッドトリガーが実装された場合のハイブリッドイベントレートはモンテカルロシミュレーションで計算されている。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6.22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5,000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。

TALE 実験SDアレイは2017年2月以前はTA 実験SDと同型のSD、エレクトロニクス、データ収集システムによりSD16台で稼働していた。このTA 実験SDアレイと同型のシステムによるTALE 実験SDアレイの稼働はFDからのハイブリッドトリガーを実装しており、この稼働期間中にハイブリッドイベントが取れている。図6.23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。

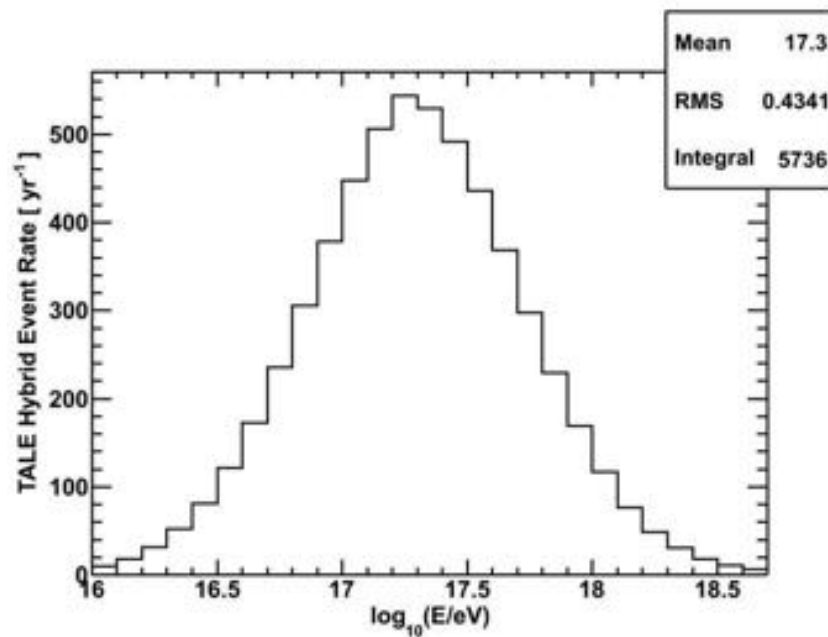


図 6.22: モンテカルロシミュレーションで計算された、TALE 実験の1年間のハイブリッド観測から期待されるイベント数。

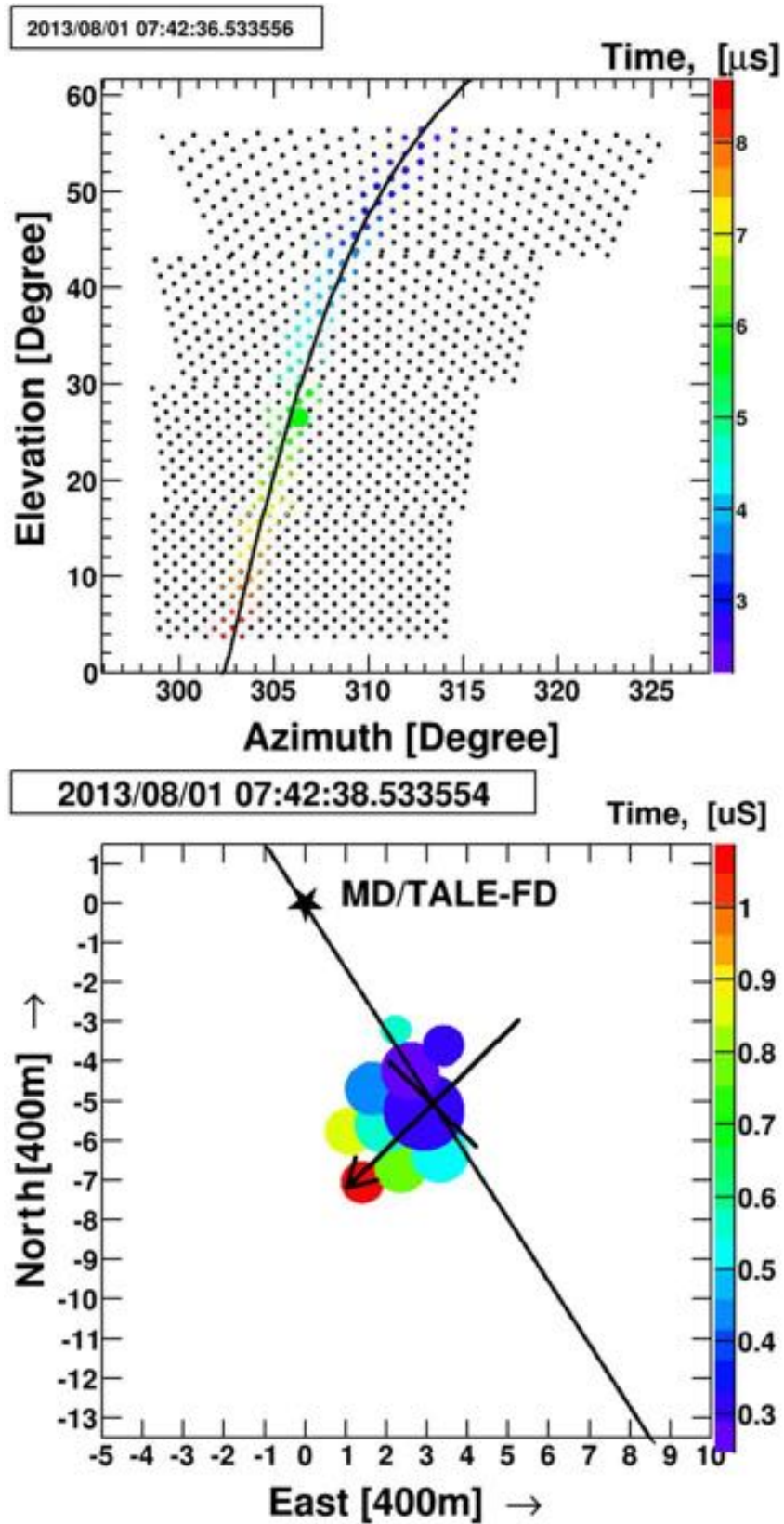


図 6.23: (上)TALE 実験 FD によるハイブリッドイベントの 1 例のイベントディスプレイ。(下)SD による上と同じハイブリッドイベントのイベントディスプレイ。

第7章 結論

TALE 実験 SD 用に選定した無線 LAN モジュールに合わせて、SD エレクトロニクス内の FPGA のファームウェアを新たに開発し、新型 SD エレクトロニクスを製作した。また TALE 実験 SD アレイでは、中央データ収集塔 (タワー) に新たにアクセスポイントと中央制御計算機 (タワー PC) を配置し、タワー PC 上のソフトウェアで SD アレイの運用とデータ収集を行う。このデータ収集のためのソフトウェアを新たに開発した。

ソフトウェアの完成後、米国ユタ州の TALE 実験 SD アレイにて、新型 SD エレクトロニクス、アクセスポイント、タワー PC を用いた新規データ収集システムの実地運用試験を実施した。SD は TALE サイトにすでに設置されている SD のうち、その時点で使用可能な 14 台の SD を使用した。その結果、約 1 週間の安定稼働に成功し、空気シャワーアレイとして運用できることが確認できた。

2017 年 2 月に TALE 実験 SD を試験的に設置し、エレクトロニクスを 87 台の SD にインストールすることで SD87 台による TALE 実験 SD アレイの稼働が開始した。初期運用では実地運用試験時と同じデータ収集システムを使用しており、このシステムにおいて「タワー PC と SD 間の通信に要する時間」と「ハーフコネクションによるデータの損出」という問題が発生した。

この問題を解決するために通信に使用するプロトコルを TCP からコネクションレス型の UDP へ変更すると決定し、タワー PC のソフトウェアとエレクトロニクスのファームウェアについて UDP 仕様のもを新たに開発した。その完成後、TALE 実験 SD のファームウェアとタワー PC のソフトウェアを更新し、通信に UDP を使用したデータ収集システムでの稼働を開始した。その結果、タワー PC が 1 台の SD と通信するのに要する時間は平均 5.9 ミリ秒であり、TALE 実験の SD103 台全台と通信できることがわかった。

TALE 実験 SD アレイでは通信エラーによるトリガーデータの損出を減少させるためにリカバリ通信を実装し、それによって未実装の場合と比べて損出率を 10 分の 1 以下にすることができている。また、TALE 実験 SD アレイの全体の稼働状況と SD 個別の状態についてモニターデータを作成することで安定動作の検証をしている。

TALE 実験 SD アレイにおける空気シャワー判定であるレベル 2 トリガーの条件は SD の配置による違いから TA 実験 SD アレイのものとは変更している。この条件によるトリガーレートは年間で約 90,000 事象であると実験データから計算した。TALE 実験では FD と SD によるハイブリッド観測を行うので、それには SD アレイにおいて FD からの外部トリガーを使用するハイブリッドトリガーの実装が求められる。この開発は現在進行中であり、実装された場合は年間 5,000 事象のハイブリッドイベントがモンテカルロシミュレーションの結果から期待されている。

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数多くの丁寧かつ熱心なご助言、御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いたします。

また、幾度となくご助言、御指導頂きました大阪市立大学の常定芳基準教授に深く感謝致します。

本研究の、特に進歩報告の場において様々なご助言を頂きました大阪市立大学の Bokkyun Shin 博士に深く感謝いたします。

毎週の研究室会議においてご助言を頂きました愛知工業大学の小島浩司教授、大嶋晃敏准教授に感謝致します。

東京大学宇宙線研究所の野中敏幸助教、木戸英治特任助教、榊直人博士、立命館大学の奥田剛司特任助教には SD に関する知識全般において数多くのご指導、ご助言を頂きましたことを深く感謝いたします。

東京大学宇宙線研究所の竹田成宏助教、信州大学の冨田孝幸助教にはユタでの観測作業と試験作業において丁寧なご指導を頂き、またユタでの生活全般において大変お世話になりましたことを深く感謝いたします。

データ収集システムの開発を共に行った大阪市立大学の高橋優一氏には、SD エレクトロニクスやタワー PC に関する多くのことを教えていただき、さらに毎日の研究生活だけでなく、ユタでの生活においても大変お世話になりましたことを深く感謝いたします。

大阪市立大学の 大野木瞭太氏、岸上翔一氏、Rosa Mayta Palacios さんには毎日の研究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いただき、ご助言をいただきましたことを深く感謝いたします。

毎日の研究生活の中で支えとなって頂きました大阪市立大学の 高木芳紀、織田浩行氏、尾村勇吾氏、藤田慧太郎氏、中井慧氏、田上裕太氏、藤原亮太氏に感謝いたします。

東京大学宇宙線研究所の 佐川宏行教授、福島正己名誉教授、池田大輔特任助教、藤井俊博博士、川田和正特任助教、神奈川大学の 有働慈治助教、山崎勝也助教、大阪電気通信大学の 多米田裕一郎講師、成均館大学の 武石隆治博士、大阪市立大学技術職員の 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いたします。

ユタ大学の John N. Matthews 教授、Gordon Thomson 教授、Robert Cady 博士、Cosmic Ray Center の Dave Barr 氏にはユタでの観測作業や生活でお世話になりましたことを感謝いたします。

大阪市立大学の理学部支援室、大学経理課、研究支援課の皆様、宇宙線物理学研究室秘書の 勝村美枝子さん、東京大学宇宙線研究所の 木次敦子さん、井戸村貴子さん、大阪市立大学生協の 田中琴美さん、甲斐笹弥香さんには事務処理などでお世話になりましたことを感謝いたします。

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」、日本学術振興会科学研究費補助金 (特別推進研究) H27 ~ H31 「拡張テレスコープアレイ実験 - 最高エネルギー宇宙線で解明する近傍極限宇宙」、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。関係機関の皆様には感謝いたします。

最後に、研究生活を支えてくれた家族、友人に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Nagano, *New J. Phys.*, **11**, 065012(2009).
- [2] 日本物理学会誌 *Vol.71, No 4, 2016* (2016).
- [3] S. Ogio, F. Kakimoto, *Proc. 28th Int. Conf. Cosmic Rays.*, **1**, 315(2003).
- [4] J.A.Simpson, *Ann. Revs. Nucl & Part. Sci.*, **33**, 323(1983).
- [5] T.K. Gaisser, "*Cosmic Rays and Particle Physics*", Cambridge University Press (1990).
- [6] D. R. Bergman, et. al., *astro-ph/0603797*(2006).
- [7] 木舟 正, 宇宙高エネルギー粒子の物理学, (2004).
- [8] K. Kamata, J. Nishimura, *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, **6**, 93(1958).
- [9] K. Greisen, *Progress in Cosmic Ray Physics III*.(ed.by J.G. Wilson), **27**(1956).
- [10] J. Linsley, et al., *J. Phys. Soc. Japan.*, Suppl A-III **91**(1962).
- [11] K. Greisen, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **10**, 63(1960).
- [12] J. Linsley, *Phys. G: Nucl. Phys.*, **12**, 51(1986).
- [13] T. Hara, *Proc. of 18th ICRC.*, **11**, 27(1983).
- [14] KASCADE-Grande Home Page, <https://web.ikp.kit.edu/KASCADE> (2018/02 現在)
- [15] A.A. Ivanov, et al., *EPJ Web of Conference* **53**, 04003(2013)
- [16] V.V. Prosin, et al., *EPJ Web of Conference* **99**, 04002(2015)
- [17] The IceCube Collaboration, *Proc. of 34rd ICRC*, 0334(2015)
- [18] A. Haungs, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0300(2013)
- [19] W. Apel, et al., *Phys. Rev.Lett.*, **107**, 171104(2011).
- [20] W. Apel, et al., *Phys. Rev.D.*, **87**, 081101(R)(2013).
- [21] S.P. Knurenko, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0053(2013)
- [22] R. Abbasi et al., *Astroparticle Physics*, **80**, pp. 131-140(2016).
- [23] R. Abbasi et al., *Arxiv*, 1801.09784 (2018).
- [24] R. Abbasi et al., *The Astrophysical Journal*, **790**, L21(2014).

- [25] 米田泰久, 修士論文 大阪市立大学 (2013).
- [26] 斎藤公記, TA 実験 278:TA×4 実験用地表検出器の R&D 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016)
- [27] W.M. Yao, et al., *J.Phys.G. and Nucl.Phys.*, **33**(2006).
- [28] S. Ogio, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0717(2013).
- [29] S. Ogio, et al., *EPJ Web of Conference* **53**, 08020(2013).
- [30] 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).
- [31] 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).
- [32] 後藤昂司, 修士論文 大阪市立大学 (2014)
- [33] 小西翔吾, 修士論文 大阪市立大学 (2016)
- [34] 高橋優一, 修士論文 大阪市立大学 (2017)