

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
(Development of a new data acquisition system
for the TALE surface detector array)

理学研究科

数物系専攻

高橋優一

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」	5
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	8
1.3.1 空気シャワー現象	8
1.3.2 空気シャワーの縦方向発達	10
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	15
1.4.1 エネルギースペクトル	16
1.4.2 質量組成	19
第 2 章 TA Low Energy extension (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	25
2.2.2 TA 実験の地表検出器	25
2.3 TALE 実験の装置の外観	27
2.4 TALE 実験の大気蛍光望遠鏡	28
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	28
2.5.1 TALE 実験の地表検出器	28
2.5.2 SD エレクトロニクス	32
2.5.3 中央データ収集塔 (タワー) の基本構成	33
2.5.4 トリガー DAQ サイクル	33
2.5.5 トリガー DAQ サイクルにおける各種トリガー	36
2.5.6 モニターデータとモニタリングシステム	39

第 3 章	TALE-SD のための新型 SD エレクトロニクス	43
3.1	新型 SD エレクトロニクス	43
3.2	無線 LAN モジュールの変更	43
3.2.1	Redpine Signals 社製 RS9110-N-11-02 の性能	43
3.2.2	RS9110-N-11-02 の取り扱い方	45
3.2.3	UART コマンド	49
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	52
3.3.1	FPGA 用ファームウェア	52
3.4	中央制御計算機 (タワー PC) の導入	54
第 4 章	TALE-SD アレイのためのタワーの新しい構成	56
4.1	アクセスポイント	56
4.1.1	アクセスポイントのタワーへの設置	59
4.2	タワー PC	59
4.2.1	タワー PC のタワーへの設置	60
4.2.2	タワー PC を用いての GPS モジュールの制御	60
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	61
第 5 章	TALE-SD アレイのための新規データ収集システムの運用試験	68
5.1	運用試験のためのセットアップ	69
5.1.1	タワーおよび TALE-SD	69
5.1.2	長距離通信試験	70
5.2	運用試験の結果と、その後のアップデート	70
5.2.1	タワー PC の稼働状況	70
5.2.2	取得した SD のモニターデータと通信エラー	71
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	73
5.2.4	SD1 台との通信に要した時間	77
5.2.5	運用試験後のアップデート	79
第 6 章	TALE 実験の現状とその性能	82
第 7 章	結論	86

要旨

宇宙線物理学という研究分野で、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と、これまでのさまざまな観測から推定されているが、一方で、より高エネルギーの $10^{18.2}$ eV \sim $10^{19.5}$ eV 領域では、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 がタワーと呼ばれる中央データ収集塔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。現在、中央データ収集塔と 35 台の SD が設置され、うち 16 台の SD は SD エレクトロニクスもインストールされ、地表検出器アレイとして稼働している。また、残りの SD は 2017 年 2 月に設置する予定である。

本研究では TALE 実験用に選定された新しい無線 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が大きく変更されている。

さらに TALE 実験では、中央データ収集塔に新たに無線 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た。その結果、約 1 週間の安定稼働に成功し、1 台のタワー PC で、計算上約 80 台の SD とデータ収集ができることがわかった。以上の結果から、2017 年 3 月より、新規データ収集システムを使用して TALE 実験地表検出器アレイ (SD80 台) にてデータ収集を開始することが決定した。

この新規データ収集システムを使用し、TALE 検出器を完成させると、ハイブリッド事象の最頻エネルギーは $10^{17.3}$ eV となり、これは“2nd knee” ($10^{17.5}$ eV 付近) より低い。また、年間事象数 5000 イベントが期待でき、数年の観測からこのエネルギー領域のエネルギースペクトルと化学組成を明らかにする予定である。

第1章 “2nd knee” 領域の宇宙線

1.1 宇宙線

宇宙線とは、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。宇宙線の主成分は陽子やその他の原子核であり、これまでに 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。

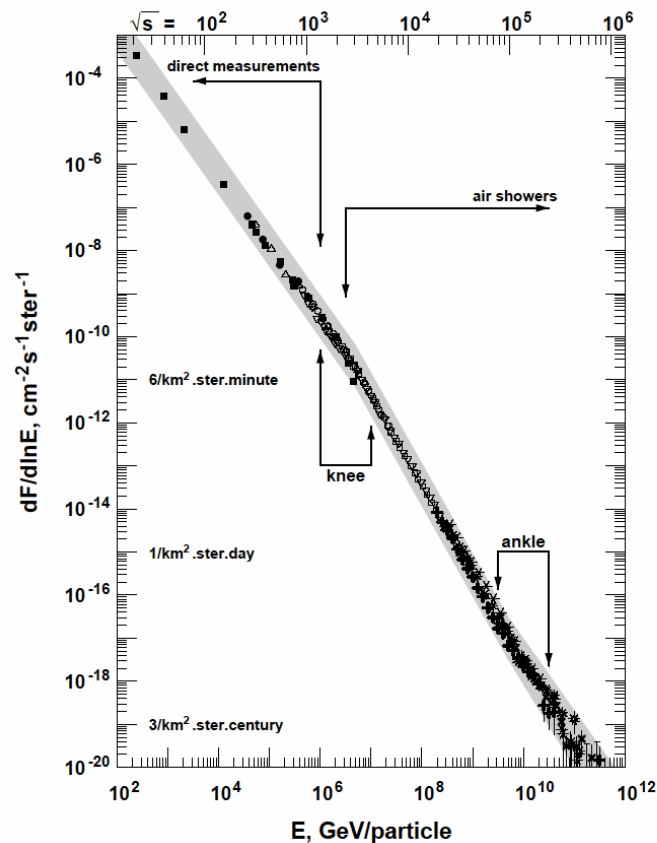


図 1.1: 一次宇宙線のエネルギースペクトル

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。

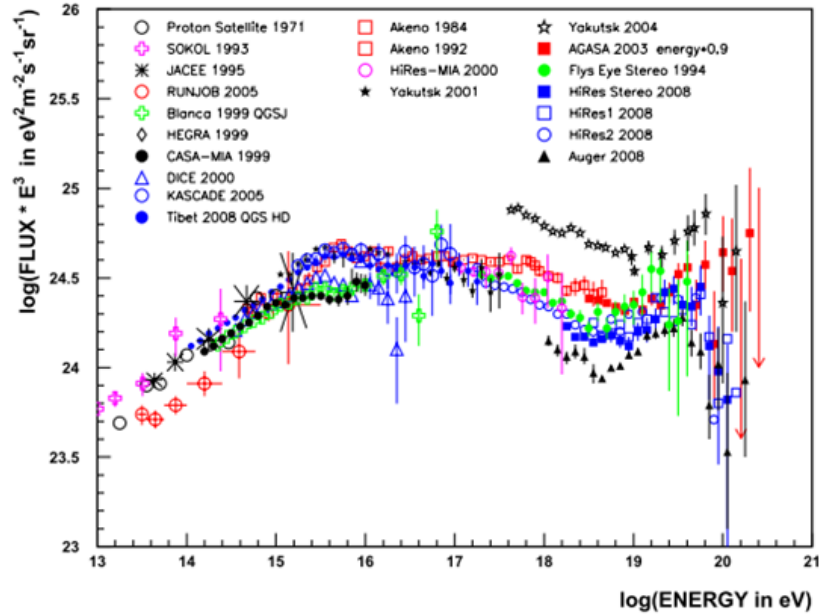


図 1.2: 一次宇宙線のエネルギースペクトル。 10^{15} eV、 $10^{17.5}$ eV、 $10^{18.5}$ eV 付近に折れ曲がり構造があることが分かる。[1]

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との相互作用、すなわち $p\gamma \rightarrow pe^+e^-$ 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るという解釈もある。このとき化学組成は ankle をはさんだ高エネルギー側、低エネルギー側どちらでも陽子のままで変化しないと予想される。この場合、 $10^{17.5}$ eV 付近の“2nd knee”で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は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ベキ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、フェルミ加速では冪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どのように遷移していくのであろうか。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陽子が主成分として見え始めると考えられている。同じエネルギーの鉄と陽子を考えると、鉄は遠くにある発生銀河から我々の銀河まで磁場による散乱のために非常に長い時間をかけなければ到達することができないが、陽子の場合と同じエネルギーで磁場による偏向が鉄の 26 分の 1 と小さいため、陽子の方がより低いエネルギーから我々の銀河まで到達することができるからである。

よって、銀河系内から銀河系外への遷移が起きているエネルギー領域では、宇宙線の主成分が重い原子核から軽い原子核へ極端に変化することが期待される。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)。

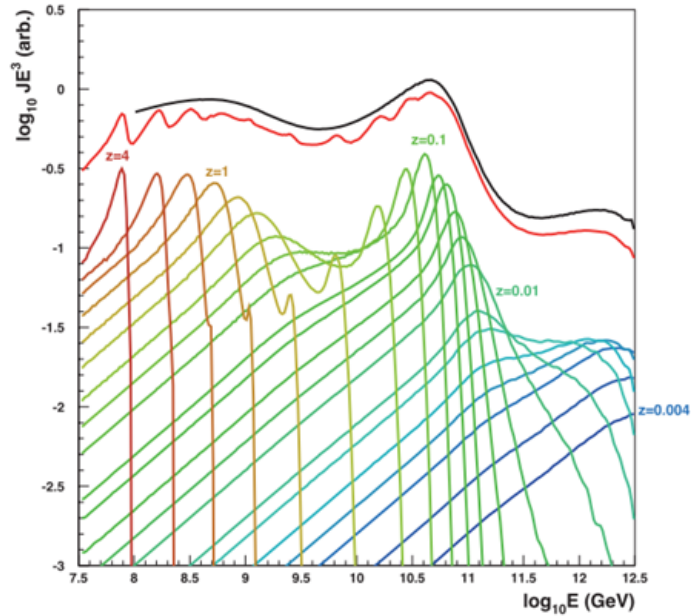


図 1.3: 各エネルギーで宇宙線フラックスに寄与する宇宙線源の赤方偏移量 z [6]

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出来る。これによって「エネルギースペクトル」「質量組成」「到来方向分布」という観測に加えて、宇宙線源の研究のための新しい「進化」という座標軸を切り開くことが出来る。

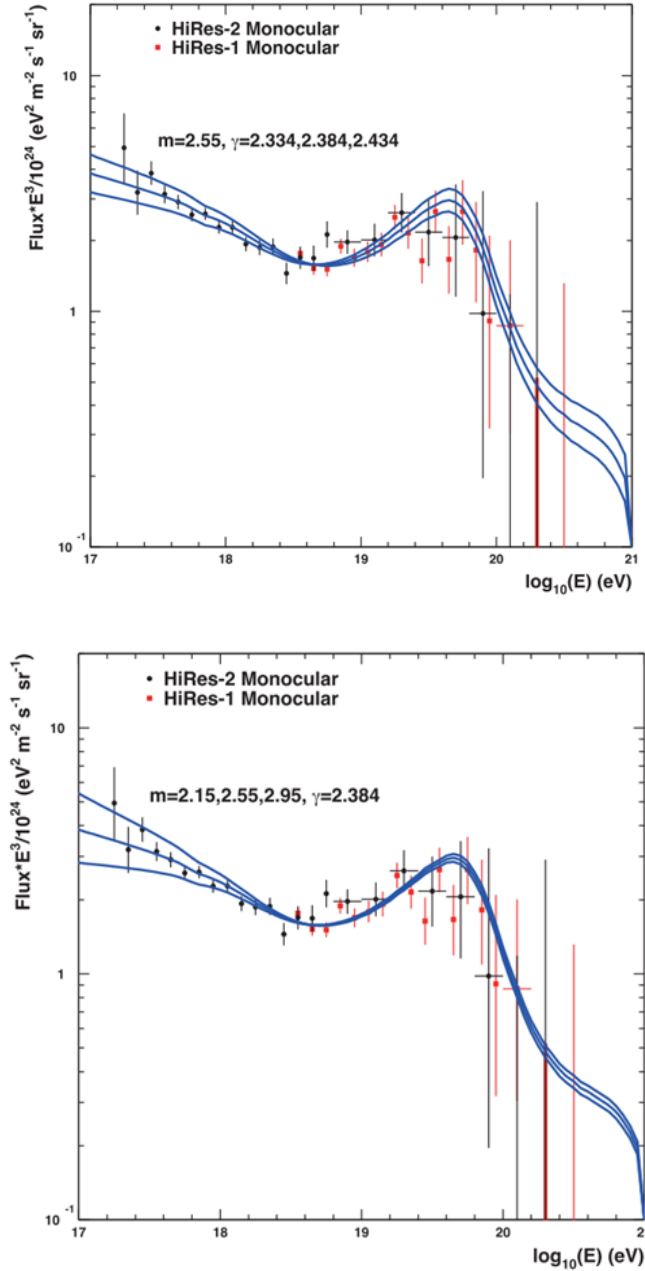


図 1.4: 極高エネルギー領域におけるエネルギースペクトルの構造へのスペクトルインデックスの変化の寄与(上)、evolution parameter(m)の寄与(下)。スペクトルインデックスの違いは、GZK領域、“2ndknee”領域の両方に現れるのに対して、 m の違いは“2nd knee”領域で顕著であることがわかる [6]。

1.2.3 LHC と空気シャワー現象

現在 LHC(Large Hadron Collider) による実験室系での最大到達エネルギーは $\sim 10^{17}$ 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、大気中の粒子との相互作用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翔体搭載検出器 (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、飛翔体搭載検出器による直接観測は難しい。そこで、高エネルギー宇宙線に対しては一次宇宙線が大気と相互作用してできる二次宇宙線 (空気シャワー) を地表で検出するという間接観測が行われている。

1.3.1 空気シャワー現象

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。

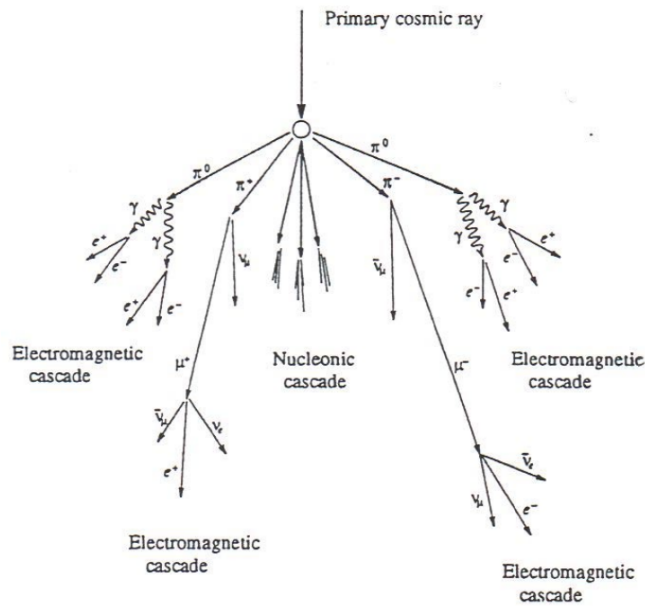


図 1.5: 空気シャワーの模式図

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 (核カスケード) を起こす。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。



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

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

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約 10 倍であるため、相互作用が繰り返されることで多数の粒子が生成される。

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。エネルギー E の電子による制動放射の断面積 σ_{brems} は、次のように Bethe-Heitler の式で表される。

$$\sigma_{\text{brems.}}(E, \nu) d\nu = \frac{4Z^2 r_e^2}{137} \frac{d\nu}{\nu} \left[\left(1 + (1 - \nu)^2 - \frac{2}{3} (1 - \nu) \right) \ln \left(184Z^{-\frac{1}{3}} \right) + \frac{1}{9} (1 - \nu) \right] \quad (1.12)$$

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

$$\left(\frac{dE}{dX} \right)_{\text{brems.}} \simeq -\frac{E}{X_0} \quad (1.13)$$

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、以下のように定義される。

$$\frac{1}{X_0} = \frac{4Z^2 r_e^2}{137} \frac{N}{A} \ln \left(184Z^{-\frac{1}{3}} \right) \quad (1.14)$$

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

$$\sigma_{\text{pp}}(h\nu, u) du = \frac{4Z^2 r_e^2}{137} du \left[\left(u^2 + (1 - \nu)^2 - \frac{2}{3} (1 - \nu) \right) \ln \left(184Z^{-\frac{1}{3}} \right) + \frac{1}{9} (1 - u) \right] \quad (1.15)$$

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

$$\left(\frac{dE}{dX} \right)_{\text{pair}} = -\frac{7}{9} \frac{E}{X_0} \quad (1.16)$$

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 $E_c \approx 85 \text{ MeV}$) 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。

$$N_e(t) \sim \frac{0.31}{\sqrt{y}} \exp \left[t \left(1 - \frac{3}{2} \ln s \right) \right] \quad (1.17)$$

$$y = \ln \left(\frac{E_0}{E_c} \right) \quad (1.18)$$

$$s = \frac{3t}{t + 2y} \quad (1.19)$$

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。

$$N_e(X) = N_{\max} \left(\frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X_0}{\lambda}} \exp \left(-\frac{X_{\max} - X}{\lambda} \right) \quad (1.20)$$

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こと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ている。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。

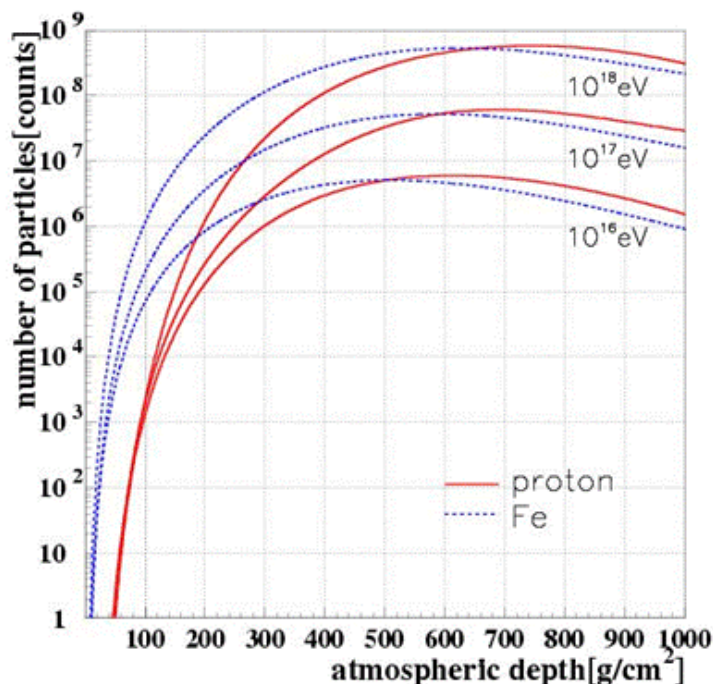


図 1.6: 空気シャワーの縦方向発達

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。

$$\rho_e(R) = C \frac{N_e}{R_M^2} \left(\frac{R}{R_M} \right)^{s-2.0} \left(1 + \frac{R}{R_M} \right)^{s-4.5} \quad (1.21)$$

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り、電磁シャワーとは異なる。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ツ

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

$$\rho_e(R) \propto \left(\frac{R}{R_M}\right)^{-\alpha} \left(1 + \frac{R}{R_M}\right)^{-(\eta-\alpha)} \quad (1.22)$$

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ため、式 (1.22) 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]。

$$\rho_e(R) = C \left(\frac{R}{R_M}\right)^{-1.2} \left(1 + \frac{R}{R_M}\right)^{-(\eta-1.2)} \left(1.0 + \left(\frac{R}{1[\text{km}]}\right)^2\right)^{-\delta} \quad (1.23)$$

いくつかのエイジにおける横方向分布を図 1.7 に示す。

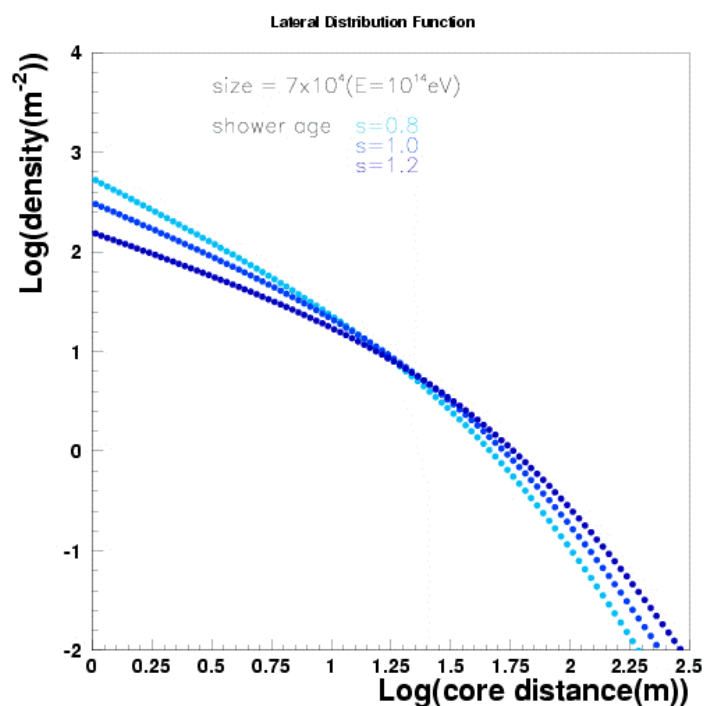


図 1.7: 空気シャワーの横方向分布

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。

大気蛍光を用いた観測

大気蛍光を用いた観測では、空気シャワー粒子の電離損失の一部が光に変換されることを利用する。高エネルギーの荷電粒子が大気中を通過すると、その軌跡の近傍にある窒素などの大気分子

中の電子は励起し、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)。

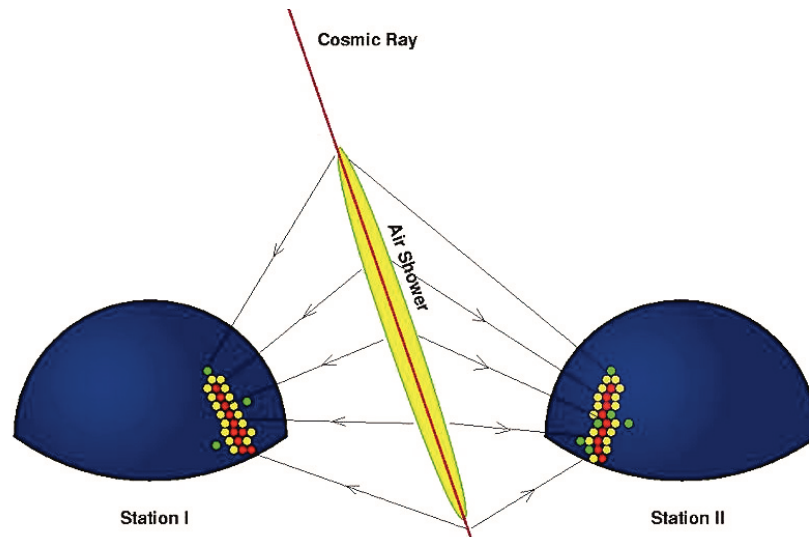


図 1.8: 大気蛍光による空気シャワーのステレオ観測の概念図

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(1.20)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(1.24)により一次宇宙線のエネルギー E_0 が決まる。

$$E_0 = \frac{\epsilon_0}{X_{\text{rad}}} \int N_e(X) dX \quad (1.24)$$

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。一次エネルギーは不定性の大きい高エネルギーハドロン相互作用の詳細に依存することなく決定される。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。

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。空気シャワー粒子は、電磁成分 (電子、陽電子、光子) とミューオン成分、さらに少量のハドロン成分からなる。

地表に設置す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、ミュー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ー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、特にミュー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ー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。

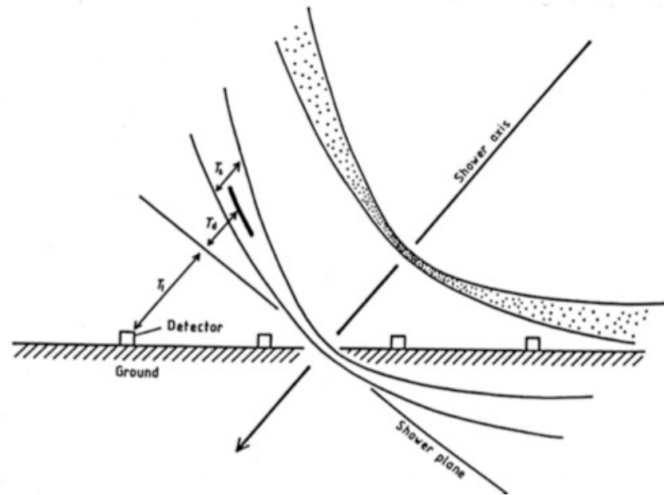


図 1.9: 地表付近の空気シャワー断面の概念図

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 neutronino 観測所

IceCube neutronino 観測所 (以下 IceCube) は南極点のアムゼン・スコット基地の近くに展開されている実験である。検出器は球型のチェレンコフ検出器を 60 個ストリング状に氷中に並べたもので、これが 120 m 間隔で 86 本、地表面から深く 1450~2450 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 γ_i はスペクトルの冪指数であり、 γ_i の値から、異なった観測方法を持つ 4 つの実験で似た構造が見られることがわかる。

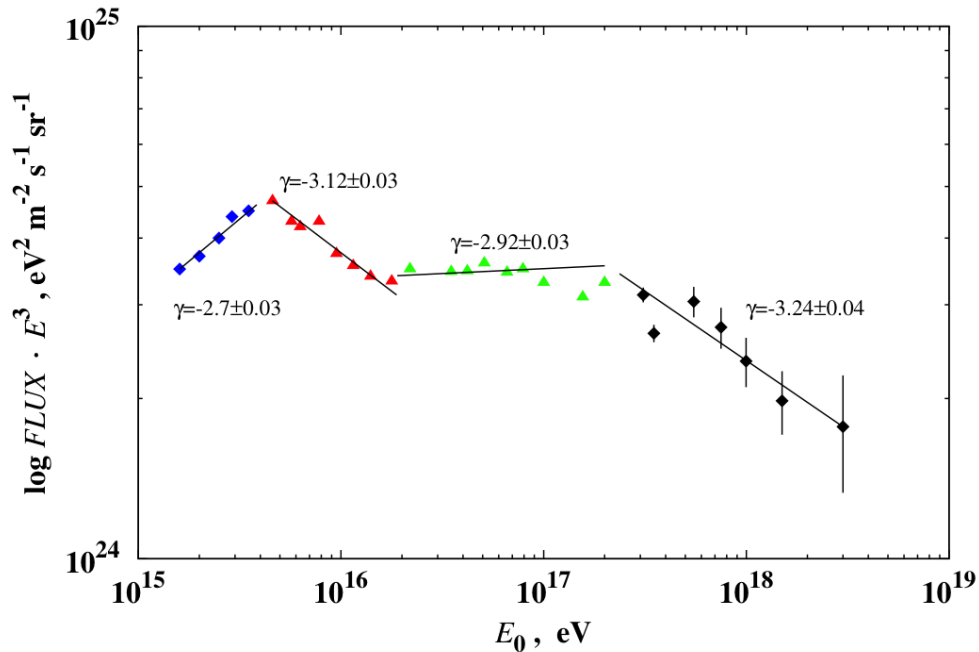


図 1.11: Yakutsk 実験で観測されたエネルギースペクトル [21]

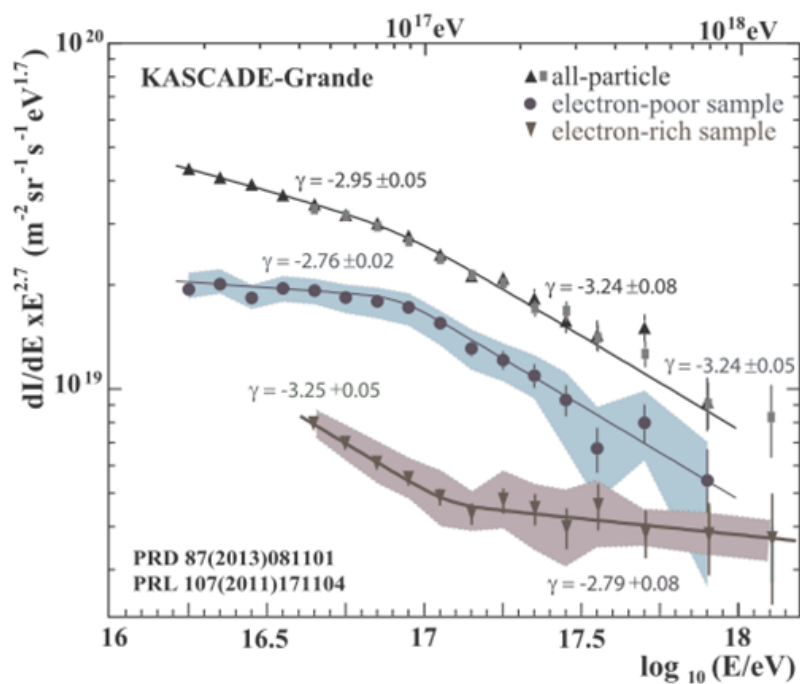


図 1.10: KASCADE-Grande 実験で観測されたエネルギースペクトル [18]。黒丸と青は muon rich、すなわち重原子核起源のシャワーのエネルギースペクトル。下三角と茶色は muon poor、すなわち軽原子核のもの。上三角と四角は全粒子スペクトルで、灰色四角が 2011 年 [19]。上三角が 2013 年 [20] に発表した結果である。色付きの領域は系統誤差の範囲を表している。

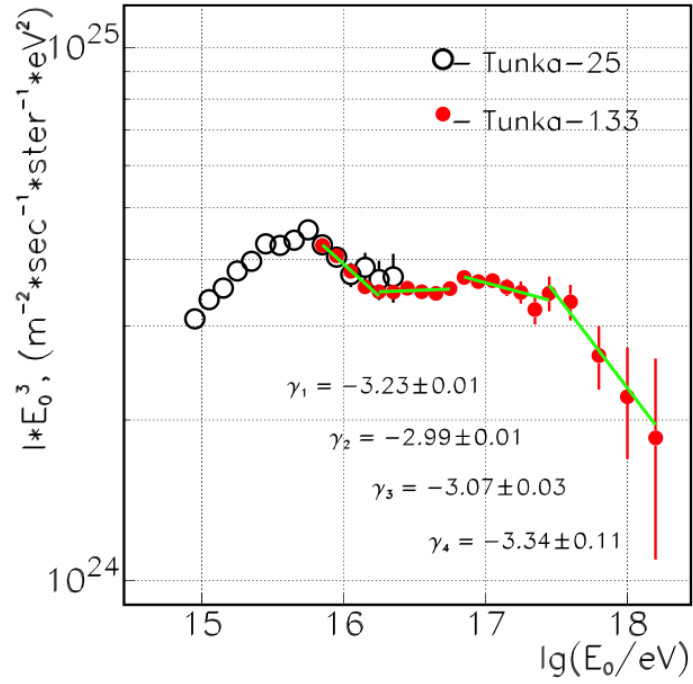


図 1.12: Tunka 実験で観測されたエネルギースペクトル [16]

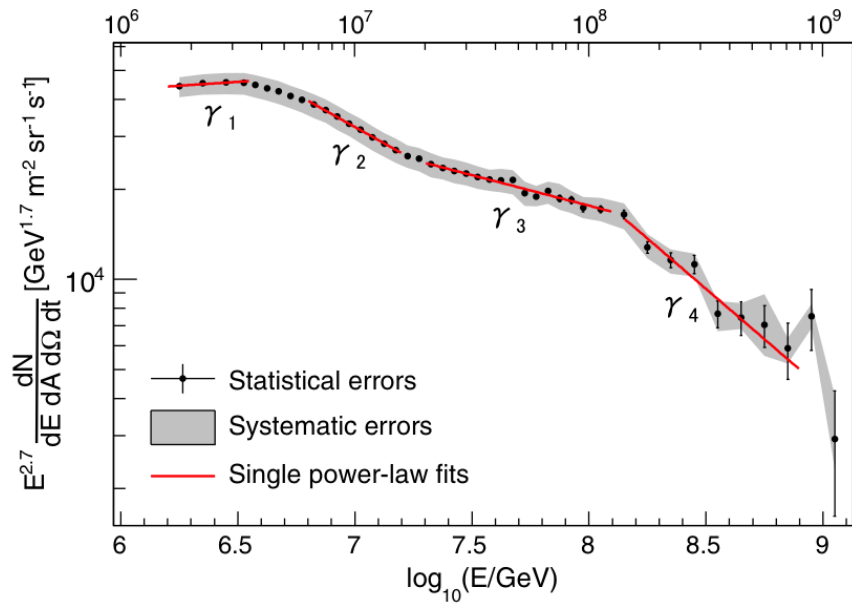


図 1.13: IceTop で観測されたエネルギースペクトル [17] $\gamma_1=2.63\pm0.06$ 、 $\gamma_2=3.13\pm0.03$ 、 $\gamma_3=2.91\pm0.03$ 、 $\gamma_4=3.37\pm0.08$

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たが、“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。しかし IceCube では、 $10^{15.5} \sim 10^{17.5}$ eV の全てのエネルギー領域で粒子種が重い原子核へと変化していく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。

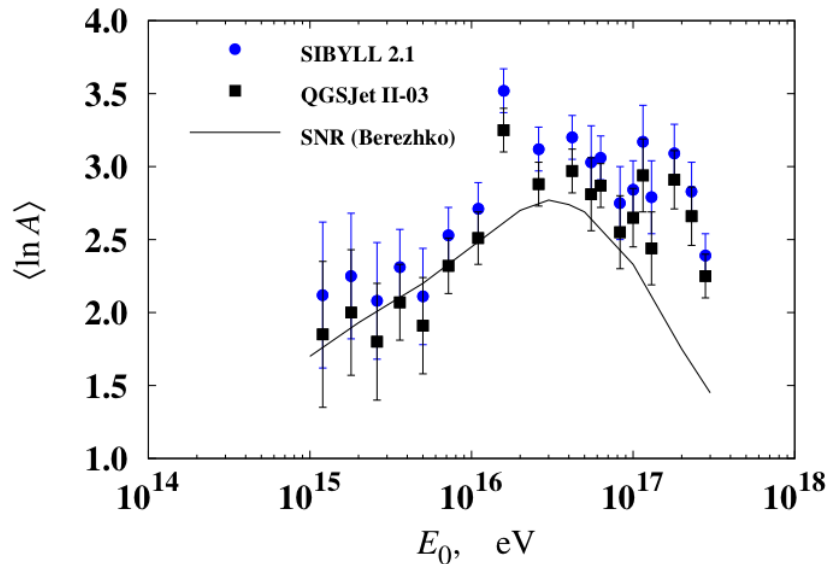


図 1.14: Yakutsk 実験で観測された質量組成 [15].

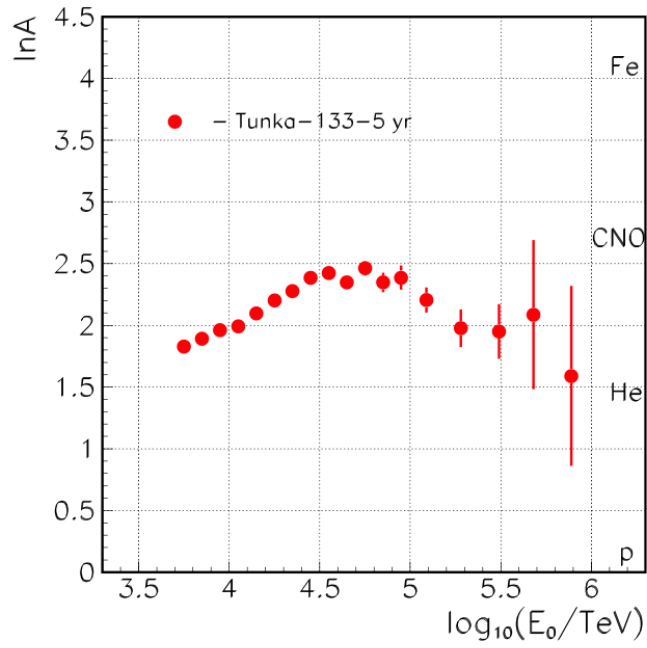


図 1.15: Tunka 実験で観測された質量組成 [16].

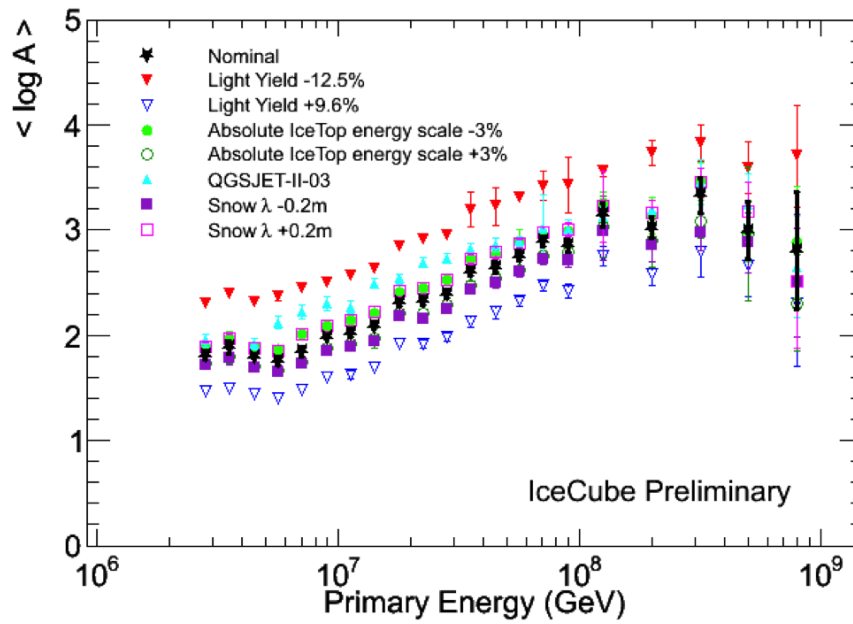


図 1.16: IceCube で観測された質量組成 [17].

第2章 TA Low Energy extension (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 (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+TALE 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。

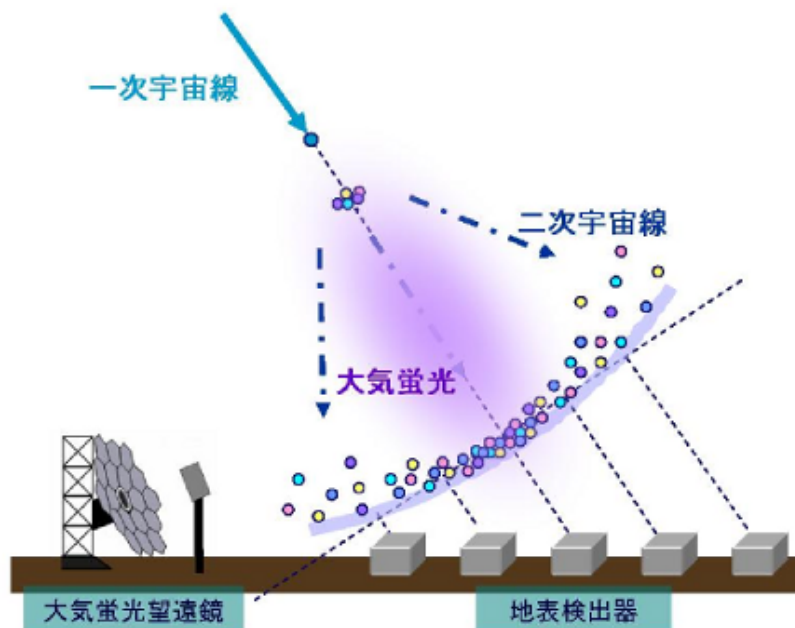


図 2.1: 空気シャワーのハイブリッド観測

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 の実験室系到達エネルギー限界 $\simeq 10^{17}$ 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種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 エネルギーから明らかにし、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 $10^{18.2} \text{ eV}$ 以上のエネルギースペクトル上にいくつかの構造が確認されている。これらの構造はそれぞれ、電子・陽電子生成による dip($10^{18.7} \text{ eV}$)、GZK pileup($10^{19.4} \text{ eV}$)、GZK cutoff($10^{19.7} \text{ eV}$) 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。

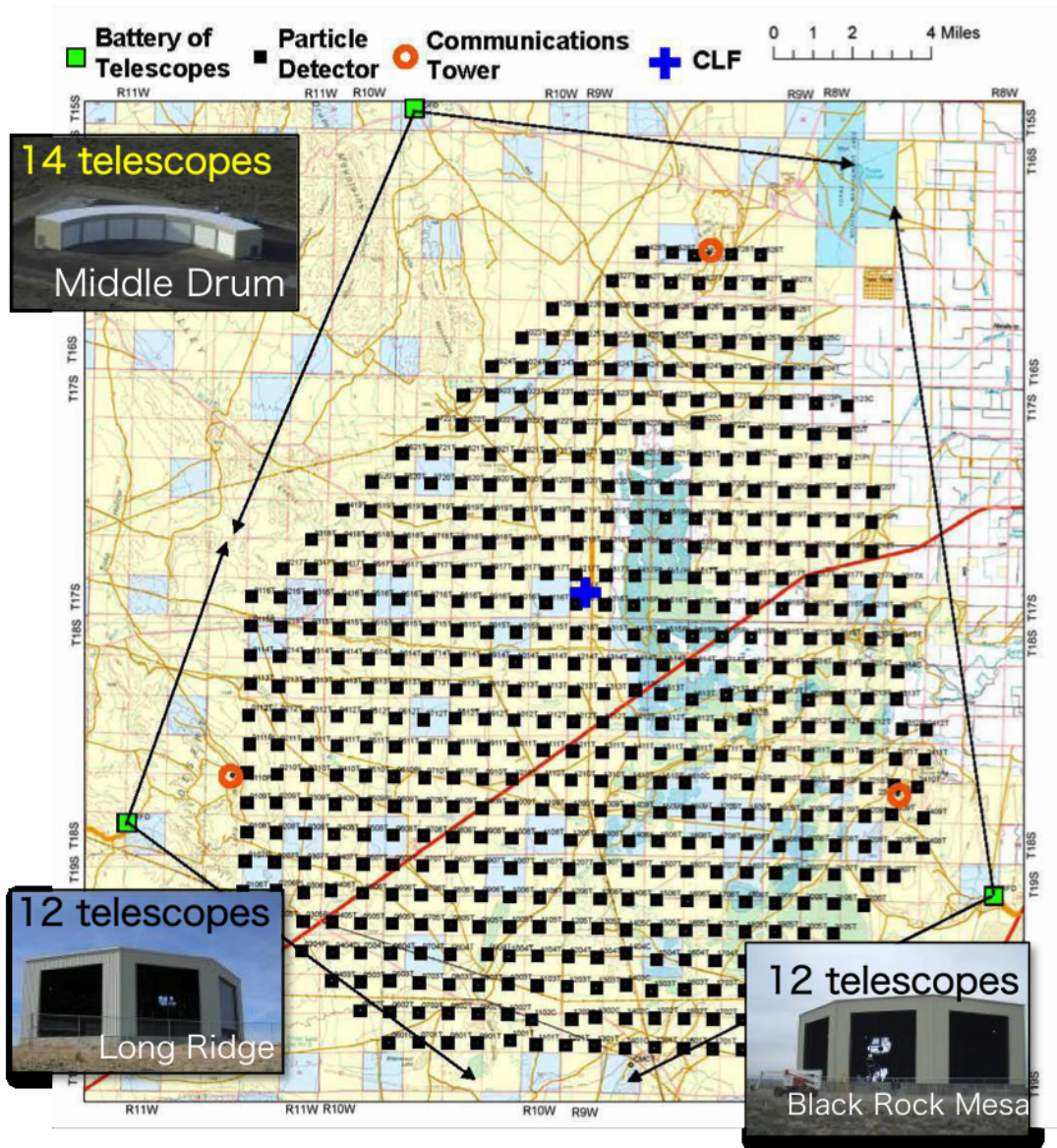


図 2.2: TA 実験における装置の配置図

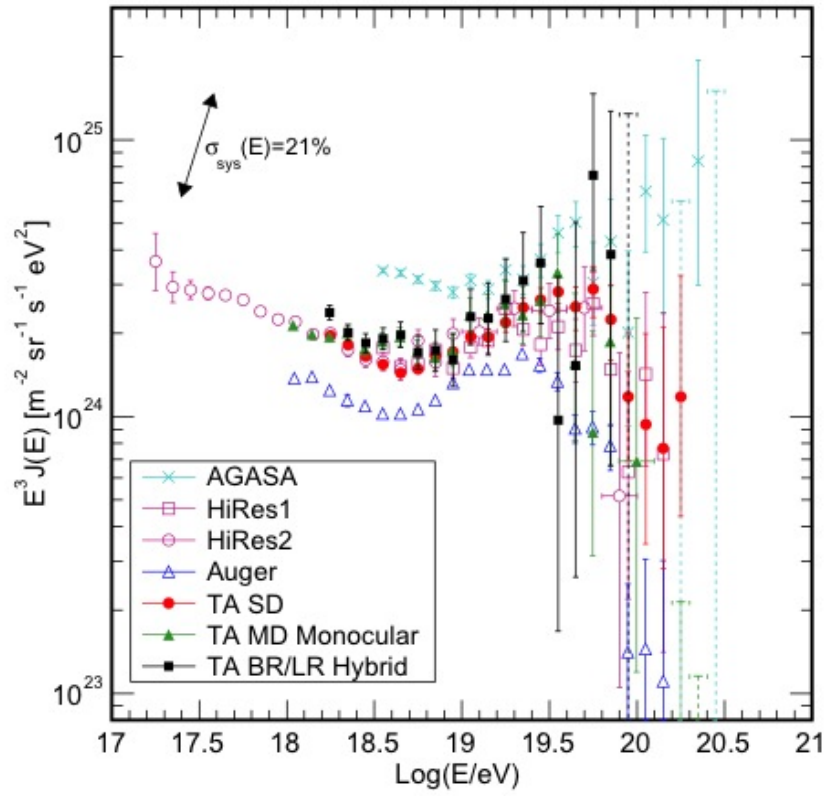


図 2.3: TA 実験といくつかの実験によるエネルギースペクトル [22]。スペクトルの微細構造を見やすくするためにスペクトルに E^3 を掛けている。

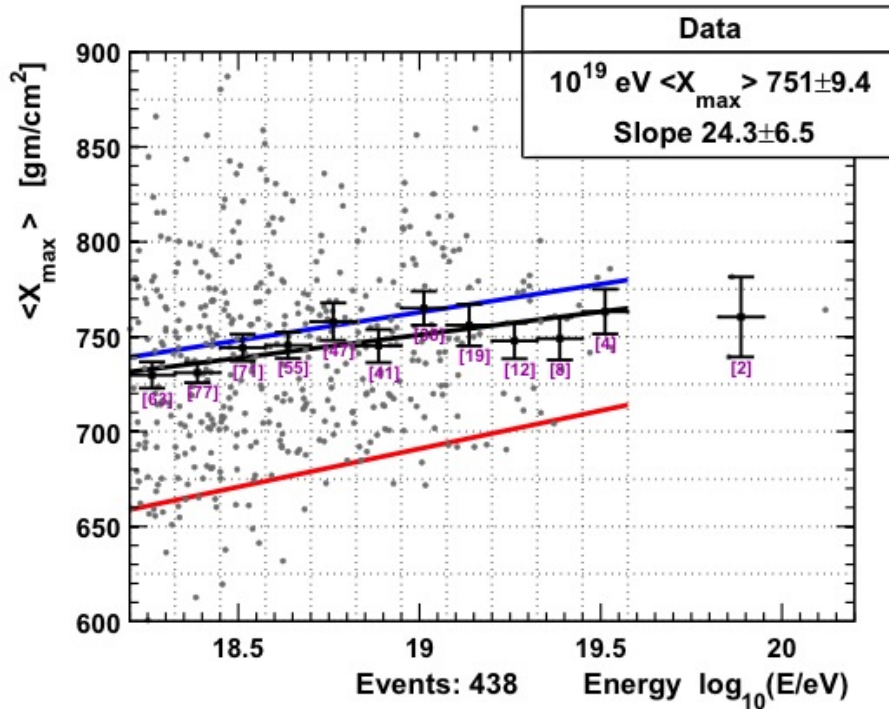


図 2.4: TA 実験による平均 X_{\max} [23]。黒が観測データ、青が陽子と仮定したとき、赤が鉄と仮定したときのシミュレーションの結果。 $10^{18.2} \text{ eV}$ 以上のエネルギー領域での観測データは、100%陽子であると仮定した時の組成と矛盾しない。

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 2.5 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 [24]。

2.2.2 TA 実験の地表検出器

TA 実験の SD アレイは間隔 1.2km の基盤目上に並べられた 507 台の SD からなり、 700 km^2 の検出面積を持つ。この SD アレイは、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。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。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。

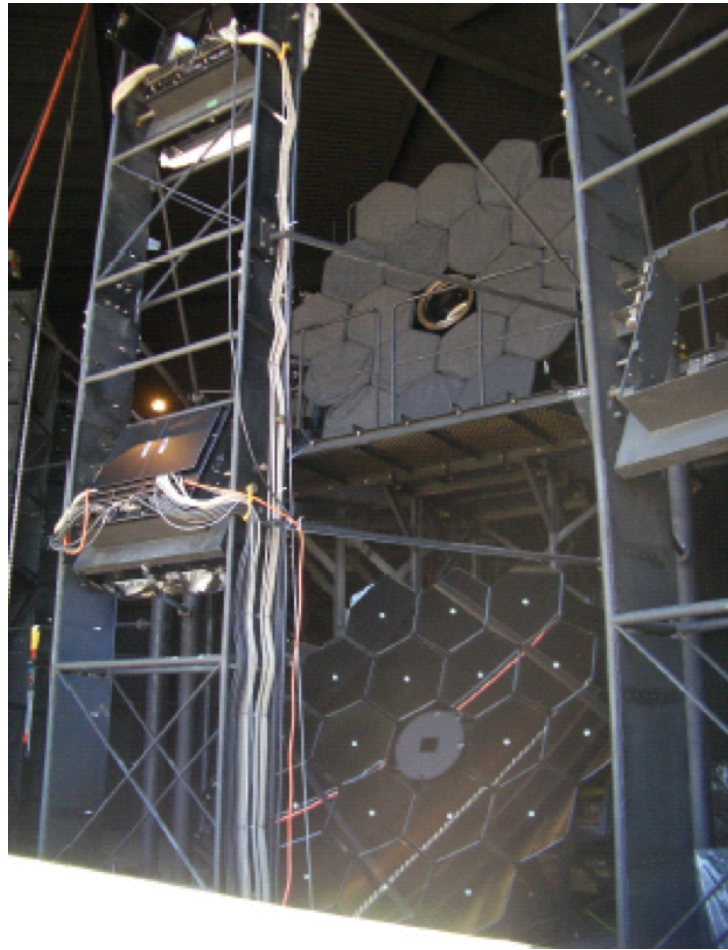


図 2.5: LR、BR ステーションの大気蛍光望遠鏡

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 2.6 に示す。

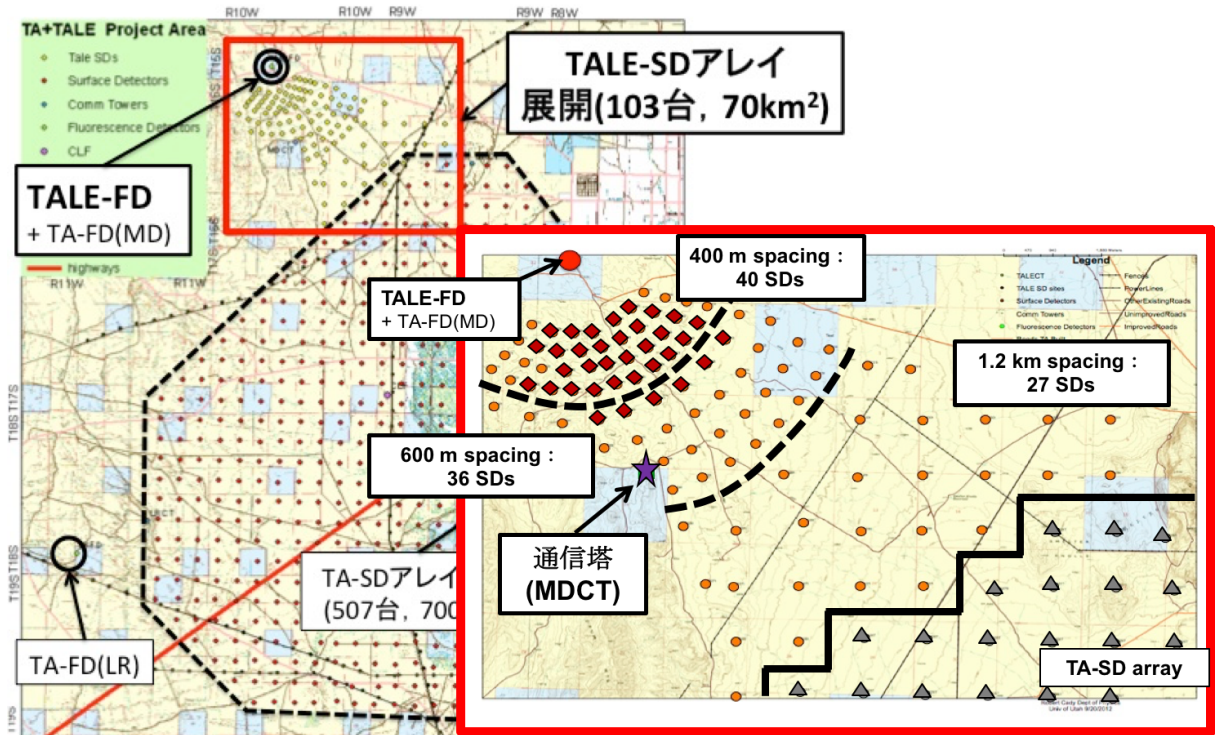


図 2.6: TALE 実験の装置の配置図。四角は SD の配置予定場所を表し、赤四角で書かれた位置には既に SD が設置されている。星は TALE 実験の中央データ収集塔である MDCT(Middle Drum Communication Tower) である。

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-FD ステーションには現在 10 台の FD が設置され、稼働している。

TALE-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する。現在は SD35 台が設置されており、そのうち 16 台には TA 実験と同じ SD エレクトロニクス (SD を制御するためのエレクトロニクス) もインストールされ、空気シャワーアレイとして稼働している。なお、この 16 台のうち 2 台の SD は、2015 年 12 月以降、エレクトロニクスのテストのために止められている。2017 年 2 月に残りの SD を全て設置し、TALE-SD アレイが完成する。

一次エネルギーが 10^{16} eV 台の空気シャワーに対して、TALE-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-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-FD ステーションは図 2.7 のように MD ステーションに隣接して設置されている。TALE-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 2.8 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 のクローバ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。

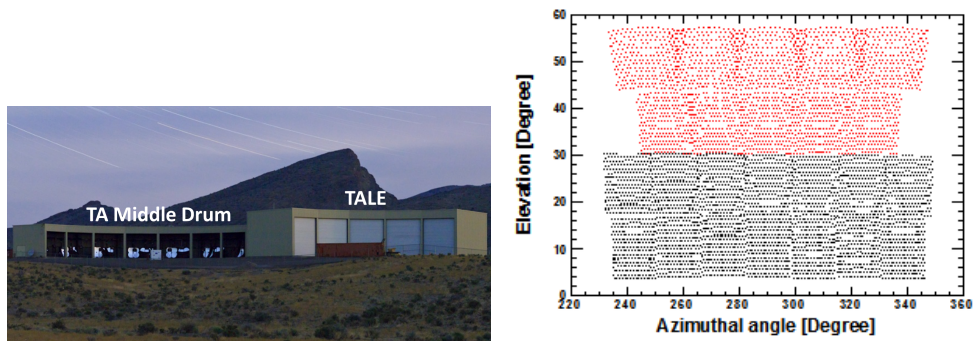


図 2.7: 左図:MD ステーションと TALE ステーション 右図:下の黒い部分が MD の視野、上の赤い部分が TALE の視野である。

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-SD アレイに現在設置している 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-SD アレイに追加で設置する SD は、PMT および波長変換ファバーの張り方が TA 実験の 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 実験の 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-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 実験で現在設置している 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 2.9 は現在設置されている SD の外観である。SD の粒子検出部分には、1.2 cm 厚、 $2.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$



図 2.8: TALE-FD ステーションの大気蛍光望遠鏡



図 2.9: 現在設置されている TALE-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 2.10: 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。

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 1.2mm 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 2.11 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。

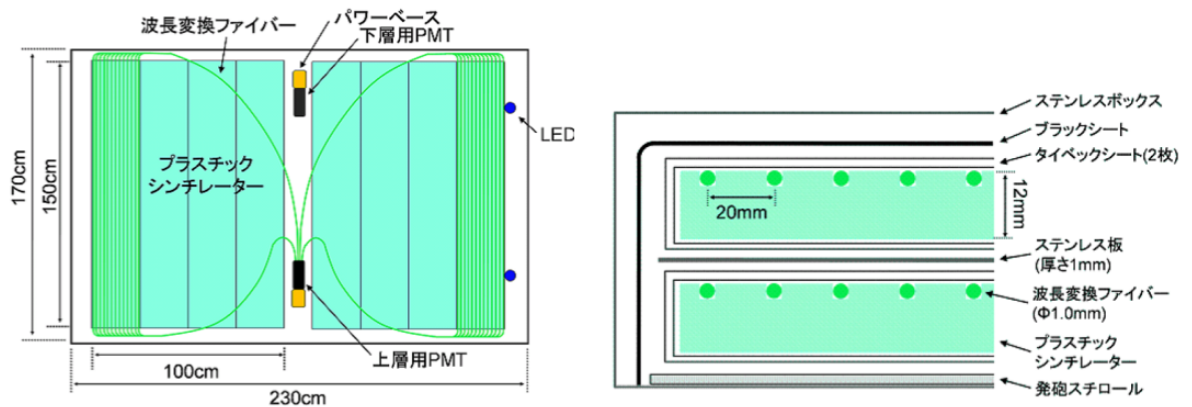
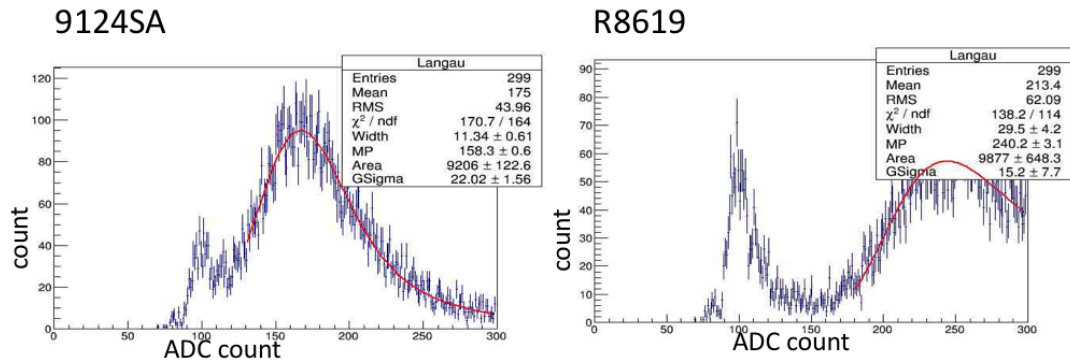


図 2.11: 現在設置している 35 台の SD のシンチレータボックスの構成図。(左) シンチレータボックスの内部構造 (右) シンチレータボックスの断面図

なお、追加で設置する SD は現行の SD とは少し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 を使用する。図 2.12 に現行の PMT と新しい 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 $10.6 \pm 0.6\%$ 光量を上げている。そして、図 2.13 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、現行のものは 2cm 間隔で張っていたが、新しく設置するものに関しては 4cm 間隔で張っている。これにより、現行のものよりもファイバーを 67% カットしている。



	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 2.12: 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。[25]

これらの変更の結果、現行の SD で取得した 1 MIP ピークは 23 ± 5 p.e. なのに対し、新しい SD で取得した 1 MIP ピークは 23 ± 2 p.e. である。よって新しい SD は現行の SD と同程度のパフォーマンスを実現できることがわかる。[25]

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 2.10 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 を制御する役割を担う 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。

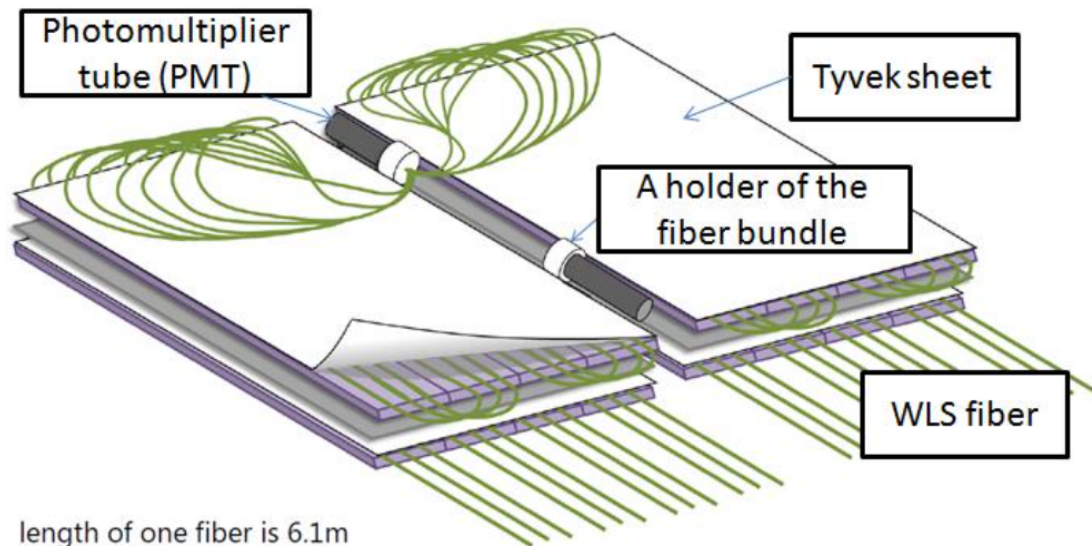


図 2.13: 新しく追加で設置する SD のファイバーの取り回し。画像は 2 枚のシンチレータに 3 本のファイバーを張っているが、実際は 2 枚のシンチレータに 7 本のファイバーを張っている。[25]

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ー社製 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 2.14 に SD エレクトロニクスの外観写真とブロック図を示す。

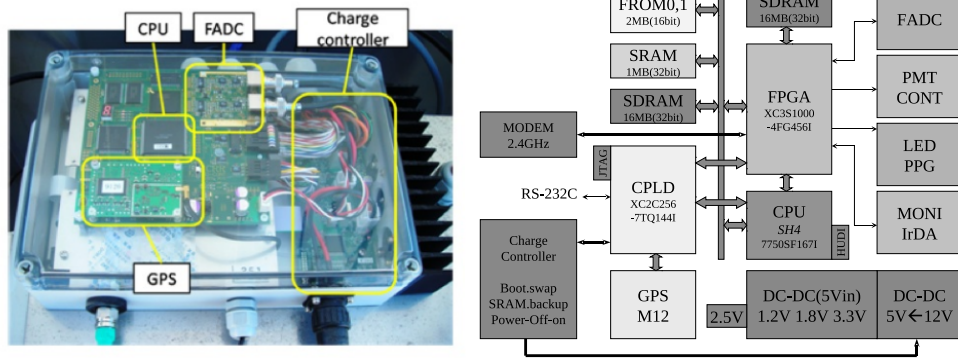


図 2.14: (左)SD エレクトロニクスの外観。(右)SD エレクトロニクスのブロック図。

2.5.3 中央データ収集塔 (タワー) の基本構成

図 2.15 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。現在、タワーは、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構成されている。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 2.16)。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、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する。これに関しては 4 章にて詳しく説明する。

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シグナルを検出する度に 2 種類のトリガーを発行する。レベル 0 トリガーとレベル 1 トリガーである。なお、各トリガーの詳細な説明については後述する。そして SD は 1 秒間のレベル 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毎秒生成する。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、これらを元にレベル 2 トリガー (空気シャワートリガー) 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ようになる。なお、ここでは 1 つの箇条書きの各項目が 1 秒に行われる処理である。



図 2.15: TALE 実験の SD アレイのための中央データ収集塔



図 2.16: 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

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する。
2. SD はレベル 1 トリガーが発行されると、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。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。
3. 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 2.17 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。

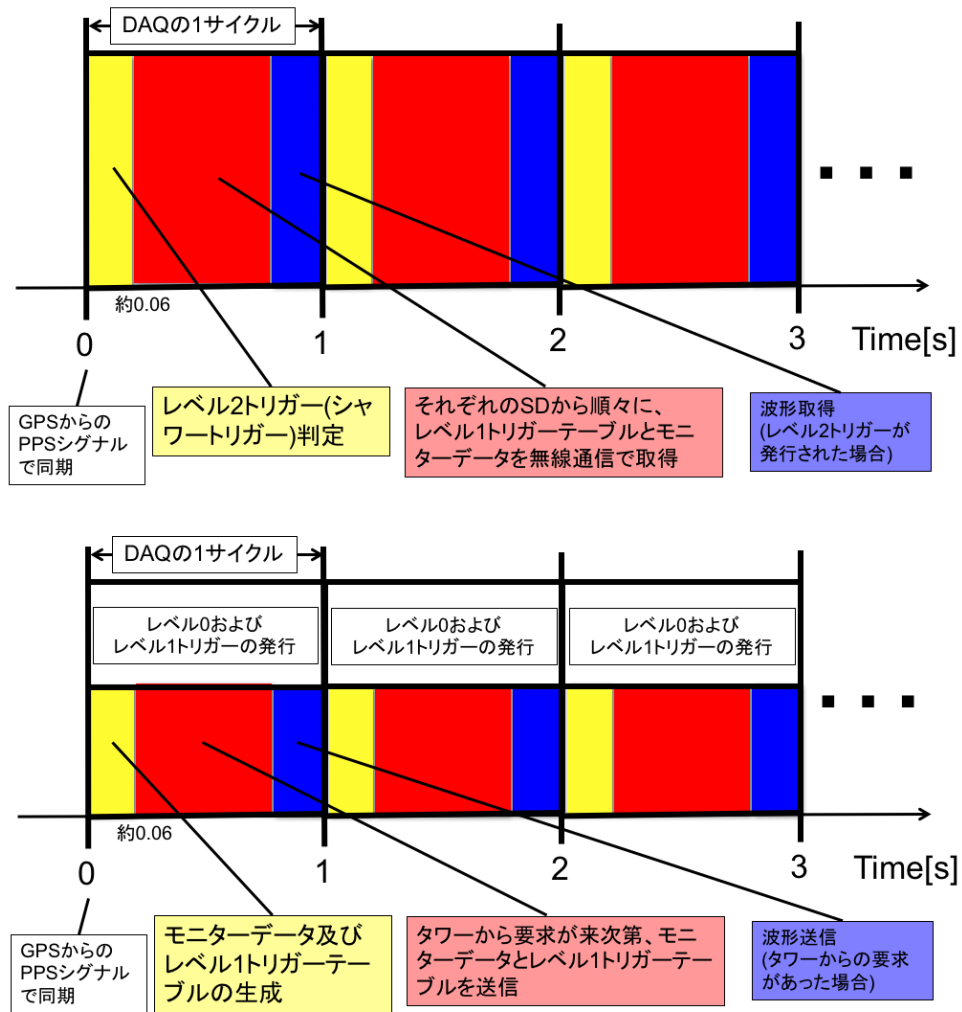


図 2.17: トリガー DAQ サイクルの概略図。上:タワーの処理、下:SD の処理

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 2.18 に物質中での粒子のエネルギー損失を示す [26]。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、スレッシュホールドは 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 packet size を大きくしすぎないためである。

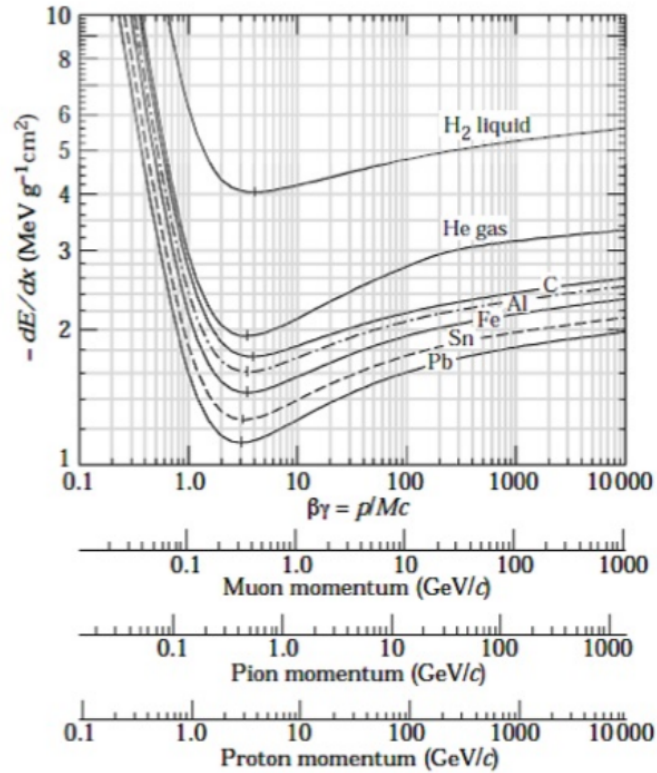


図 2.18: さまざまな高エネルギー粒子のさまざまな物質中でのエネルギー損失 [26]

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し (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 の間に二つ目のトリガーがかかった場合、波形の重複を防ぐため二つ目のトリ

ガータイミングは、一つ目のトリガータイミングの 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 トリガータブルを元にして発行される。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 2560 ns のゲート幅で積分し、スレッシュホールドである 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DESTAL 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 トリガータブルを元に、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を判定する。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25メガ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。
- 波形探查結果(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。
 - 各種温湿度。
- 収集時間間隔 10 分の情報
 - バックグラウンド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 2.19 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。

バックグラウンド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バックグラウンドミュオンによるものと考えられるので、これが、「バックグラウンドミュオン信号のヒストグラム」と呼ばれ、10 分ごとにタワーに送られる。これは、バックグラウンドミュ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 2.20 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。

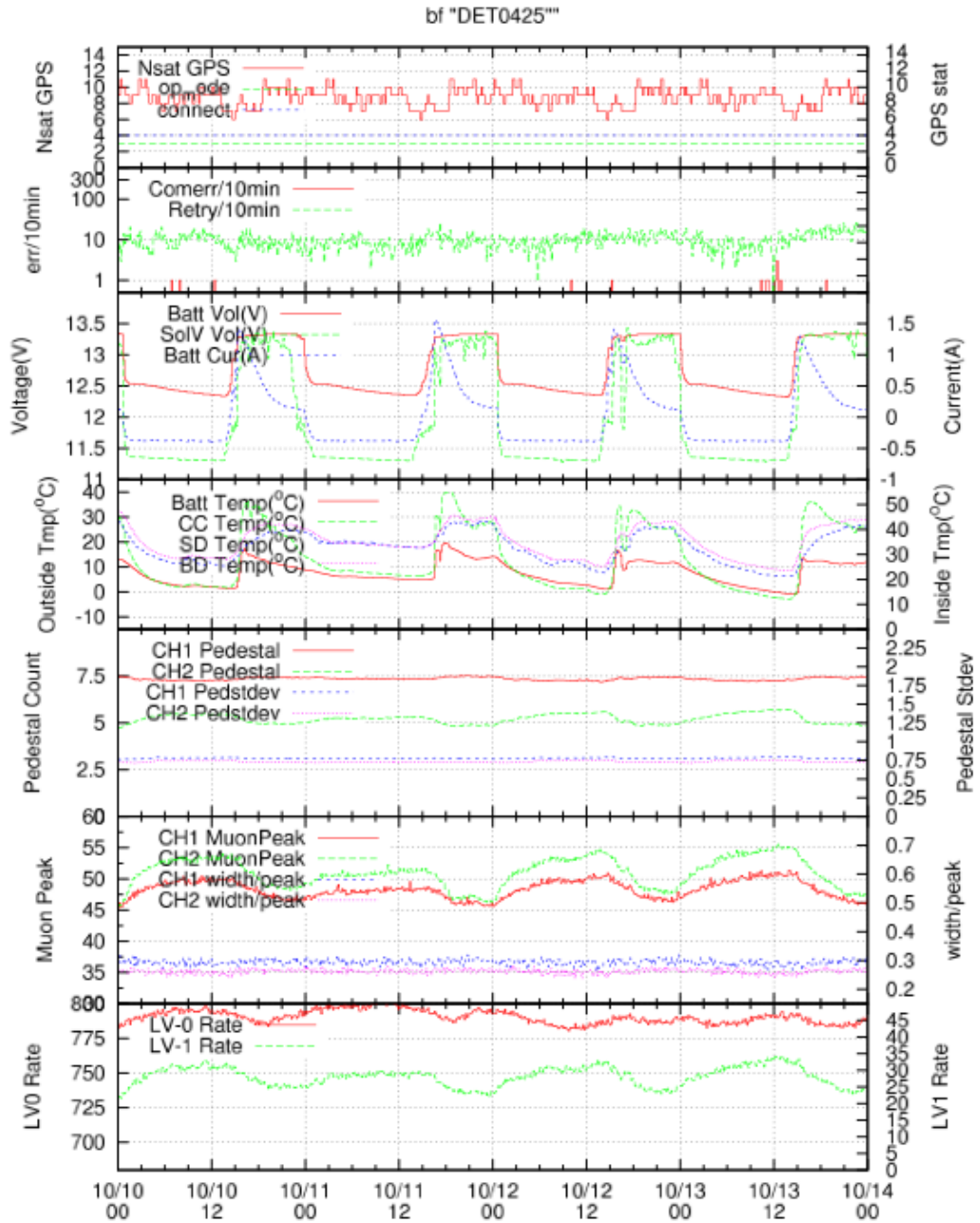


図 2.19: TALE 実験の SD のモニター例 (地表検出器ロジカル ID:0425)。上から、通信できている GPS 衛星数と GPS の状態、10 分間の通信エラー数とリトライ通信数、各種電流・電圧、各種温度、ペDESTAL のヒストグラムから求めたペDESTAL 値とその標準偏差、バックグラウンドミュオン信号のスペクトルから求めた 1 MIP ピークとその幅、トリガーレートを表す。

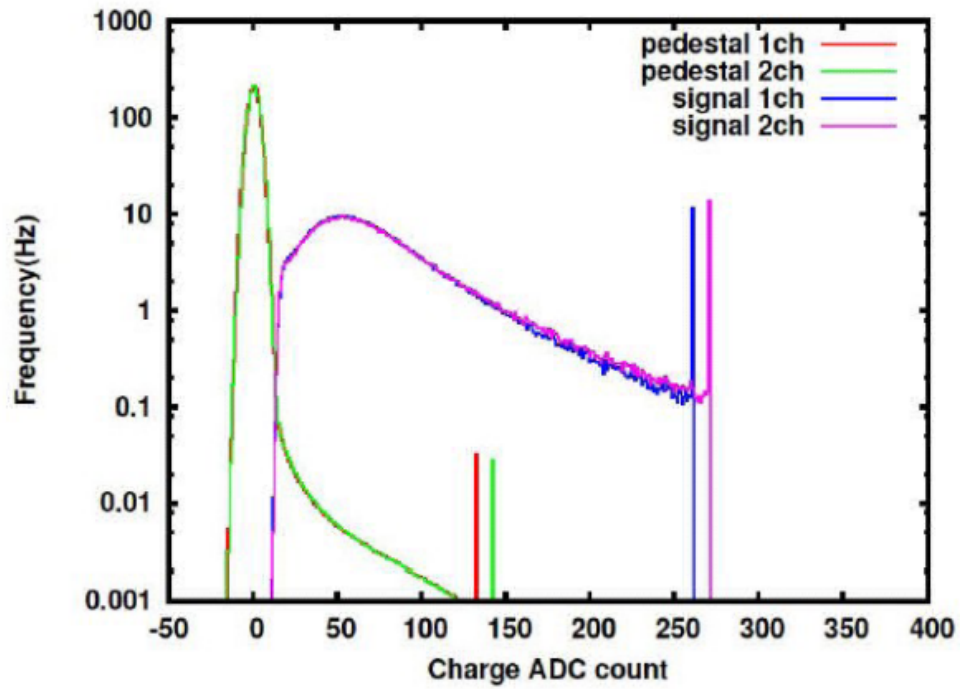


図 2.20: SD のモニター情報から得たバックグラウンドミュオン信号のヒストグラムとペDESTALのヒストグラム。緑色と赤色のヒストグラムはそれぞれ上層と下層のペDESTALのヒストグラムである。また、青色と紫色のヒストグラムはそれぞれ上層と下層のバックグラウンドミュオン信号のヒストグラムである。それぞれのヒストグラムの右側のエントリー (250 ADC カウントの後ろの立ち上がり) は over flow を示す。積分幅は 240 ns。バックグラウンドミュオン信号のヒストグラムではペDESTAL分はすでに引いてある。

第3章 TALE-SD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-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。

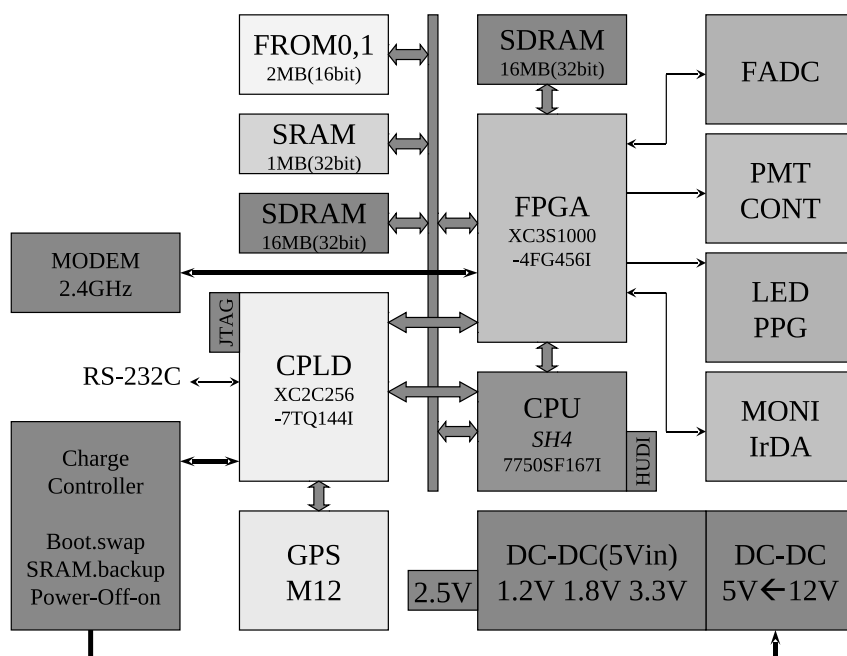


図 3.1: SDエレクトロニクスの概略図

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「レッドパイন」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

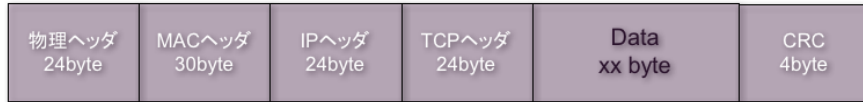


図 3.3: レッドパインのデータユニット。Data の部分には最大で 1000 Byte のデータを入れることができる。

図 3.3 にレッドパインのデータユニットを示す。Data の部分はユーザーがレッドパイン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レッドパインが用意する部分である。

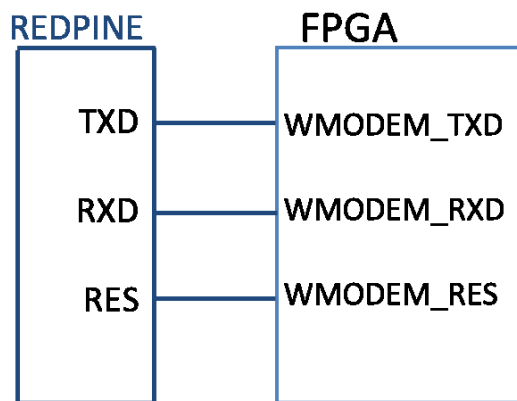


図 3.4: FPGA がレッドパインを、UART インターフェースで制御するために使用するポート。実際の接続はこれらに 3.3 V の電源供給線と GND 線を足した計 5 本のケーブルで接続している。

レッドパイン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 とレッドパインを UART 方式でシリアル通信させることでレッドパインを制御する。レッドパインと 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、レッドパインは 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、レッドパイン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レッドパインである。

3.2.2 RS9110-N-11-02 の取り扱い方

レッドパイン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 つの手順でレッドパインは起動する。



図 3.5: SD エレクトロニクスの上段部。下段部分にレッドパインを格納している。

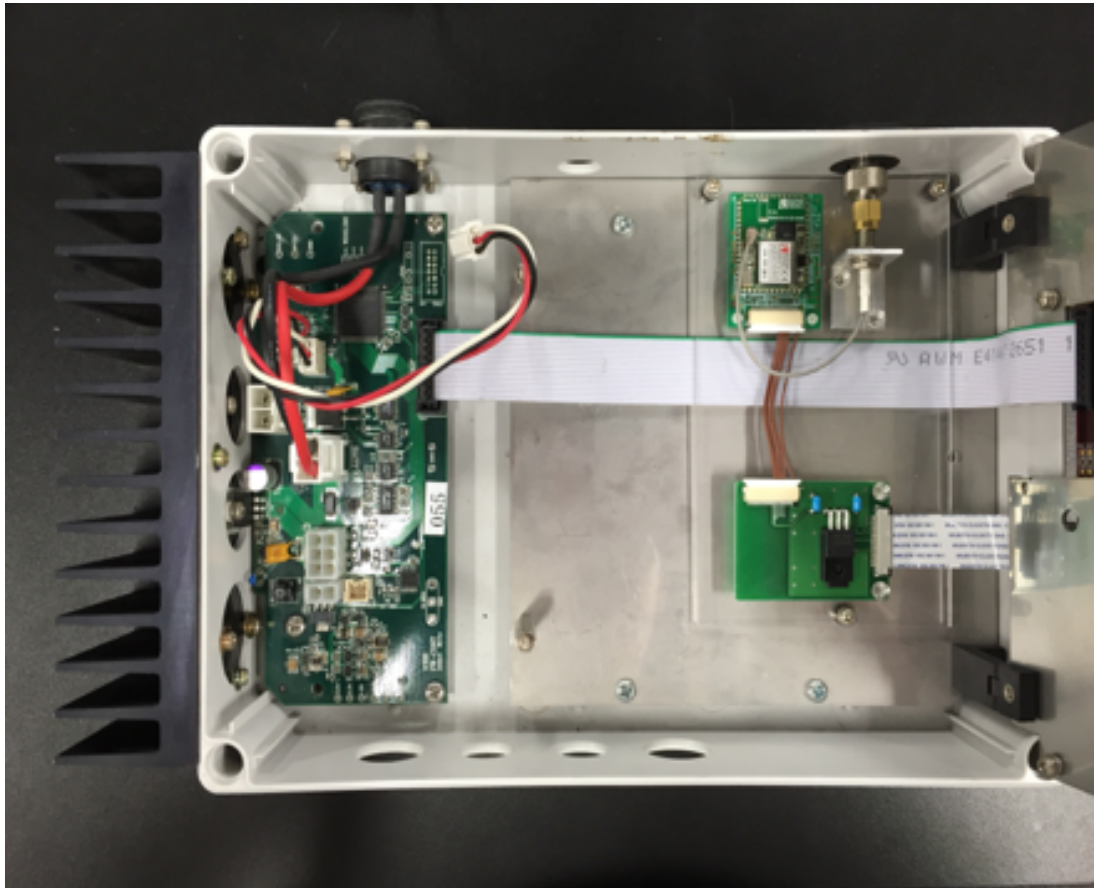


図 3.6: SD エレクトロニクスの下段部。レッドパインを格納している。

UART 仕様のレッドパインは、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、レッドパイン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)。(レッドパイン起動完了)
4. 約 100 ms 待つ。
5. 0x1C を設定したいボーレートでレッドパインに送信する。
6. 0x55 を受信する。
7. レッドパインから 0x55 を受信しなかった場合はレッドパインが 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 をレッドパインに送信する。
9. レッドパインが送出する起動メッセージを受信する。

レッドパインは起動完了後 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、レッドパイン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
```

レッドパインはシリアル通信で 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 からレッドパイン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 からレッドパインに送信し、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 までがレッドパイイン自体の初期化作業、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”をレッドパイインはシリアル通信で 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レッドパイインは UART コマンドによって操作される。レッドパイインに向けて送信する 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レッドパイインに送信する。

- 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レッドパイインに送信する。

- 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レッドパイインに送信する。

- 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 コマンドをレッドパイインに送信すると、それを受けたレッドパイイン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

次はレッドパイン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レッドパインに送信する。

- `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レッドパインに送信する。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。オートレートの場合は 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レッドパインに送信する。

- `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* にはレッドパインに設定する 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

このコマンドはレッドパイン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、以下のコマンドをレッドパイんに送信する。

- `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、レッドパインは `¥r¥n` をコマンド終了の合図として読み取ってしまうので、`¥r¥n` (16 進数で 0x0D、0x0A) を送信したい場合は 0xDB、0xDC に置き換えて送信しなければならない。

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

レッドパインは受信電波強度 (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 からレッドパインに対してシリアル送信するものであるが、レッドパインから 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。これはレッドパイン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レッドパインが 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 モジュールをレッドパイン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` にレッドパインの設定と無線 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、レッドパインの設定と無線 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レッドライン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

レッドライン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、その後にレッドラインから 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。

レッドラインの初期設定

レッドライン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、レッドライン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、実際にレッドラインに対して 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レッドパイインが受信して、それが正しく実行できるとレッドパイインはシリアル通信で 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 とすることでレッドパイインをリセットし、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。

レッドパイインの初期設定後の動作

レッドパイイン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。この状態のレッドパイインに対して、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、レッドパイインは 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。

レッドパイインのリブート

レッドパイインがアクセスポイントのネットワークから外れた場合や、コマンドを受け付けなくなった場合には TCP/IP 通信ができなくなる。このような状態に陥い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、自動でレッドパイインをリブートさせ、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 節で述べた方法でレッドパイインをリブートすることができ、レッドパイイン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。リブート条件は 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レッドパイインが 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

レッドパイインは 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、記録しておく通信相手の台数は 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、レッドパイインは 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モジュールをレッドラインに更新してしまうと、タワーエレクトロニクスのレッドラインが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-SD アレイのためのタワーの新しい構成

3.2.2 節で述べたように、新型 SD エレクトロニクスを用いる TALE-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-SD 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-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

3.2.1 節でも述べたように、TALE-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モードではレッドパインはアクセスポイントを介して通信するので、アクセスポイントが必要となる。TALE 実験用のアクセスポイントとして屋外での使用、遠距離通信、100 台以上の無線 LAN モジュールのネットワークへの参加が可能という点から、Cisco 社製 AIR-AP1572E-Q-K9 が選定された。AIR-AP1572E-Q-K9 の外観を図 4.2 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。デフォルトでは Lightweight モードになっているため、Autonomous モードで使用する際には、アクセスポイントのファームウェアを変更する必要がある。Autonomous モードのファームウェアは Cisco の公式サイトから取得する。ファームウェアの書き換えはアクセスポイントのコンソールポートに PC を接続することで行い、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用いる。Autonomous モードでのアクセスポイントの設定変更作業は、LAN ケーブルで PC をアクセスポイントの PoE の Out ポートに繋ぎ、ブラウザで行う。アクセスポイントはタワーに設置し、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。

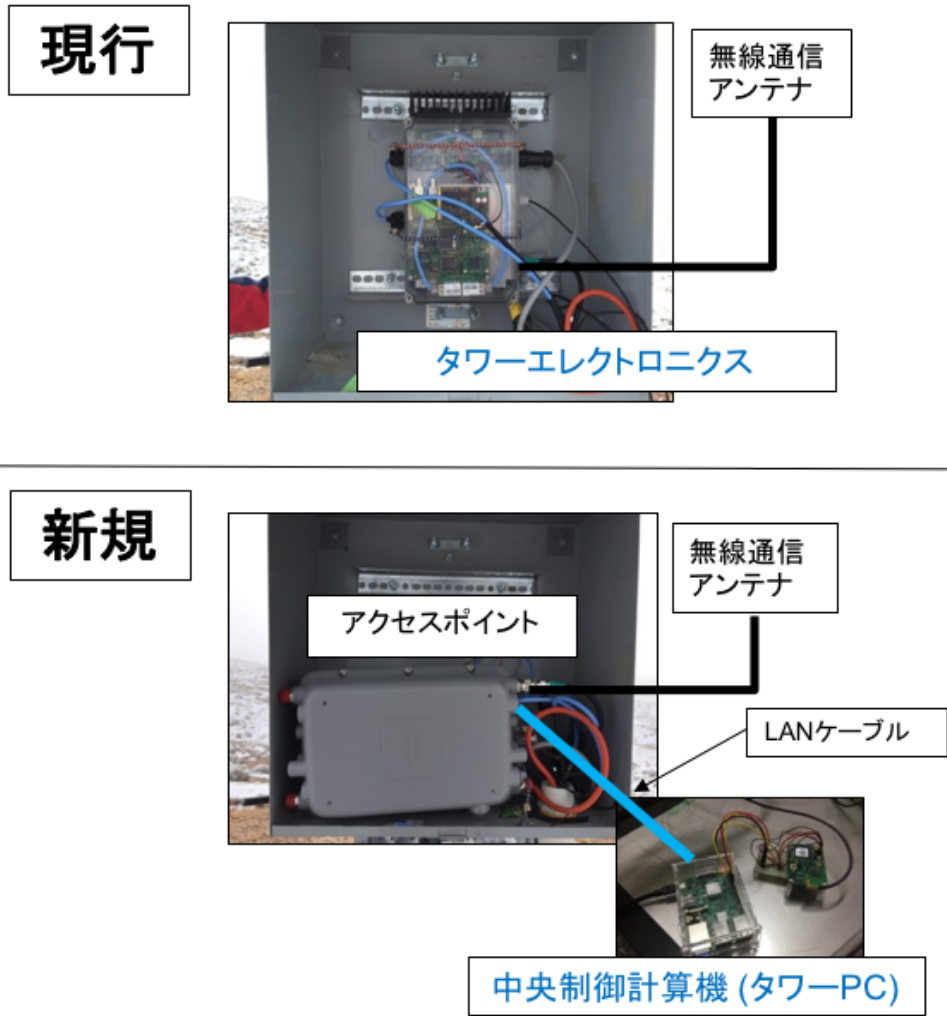


図 4.1: TALE-SD アレイのための新しいタワーのセットアップの概略図。現行のものと比較している。



図 4.2: Cisco 社製 AIR-AP1572E-Q-K9

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

表 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 4.3 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-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。なお、このアクセスポイントは 2.4 GHz 帯の無線通信において、2 本の無線 LAN アンテナを使用することが推奨されているが、2017 年 1 月現在までに実施したデータ収集テストでは無線 LAN アンテナを 1 本しか使用していない。

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 4.3: 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レッドパインを使用できない。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 4.4 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、運用とデータ収集をする。

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。



図 4.4: Raspberry Pi 2 model B

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

4.2.1 タワー PC のタワーへの設置

タワー PC はタワーのバッテリーの裏の箱の中に設置される。タワー PC は 5 VDC 電源を要求するので、実際に運用する際にはバッテリーからの 12 VDC を DC-DC コンバータで 5 V に電圧降下させて使用する予定である。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。GPS モジュールが取り付けられた状態で、データ収集ソフトウェアを稼働させているときのタワー PC の消費電力は 2 W 程度であることが測定からわかっている。

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させている。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 を要求するのに対し、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ので、図 4.5 と図 4.6 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 4.7 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 シグナルと同期させてタワー 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、自らの時刻情報に登録している。

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. 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。この時刻情報をタワー PC は記録する。
3. タワー PC はこの時刻情報を Linux の date コマンドによって自らの時間に登録する。

Eq コマンドは GPS モジュールの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。この Eq コマンドを 1 度実行すると、GPS モジュールからタワー PC に時刻情報と位置情報が毎秒送られてくるようになる。また、date コマンドは -set オプションを使用し、「date --set =”2017/1/1 1:1:1”」のようにして実行している。タワー PC の時刻のずれの拡大を防ぐために、プログラム中でこの date コマンドを 10 秒に 1 回実行して GPS の時刻と同期させている。

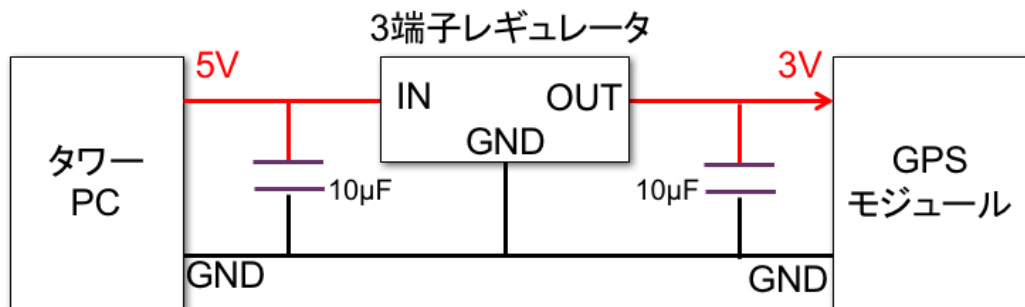


図 4.5: レギュレータ部分の回路図

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 実験及び、現在の TALE 実験でホストエレクトロニクス上で動かし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こと、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 : `dstSocket=socket(AF_INET, SOCK_STREAM, IPPROTO_TCP)`

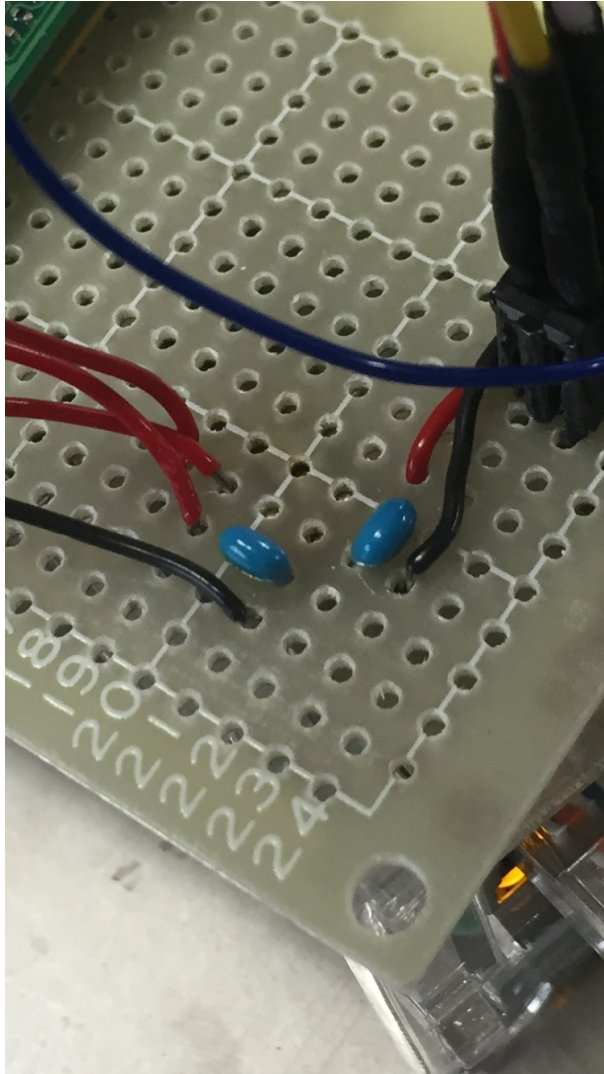


図 4.6: レギュレータ部分の写真

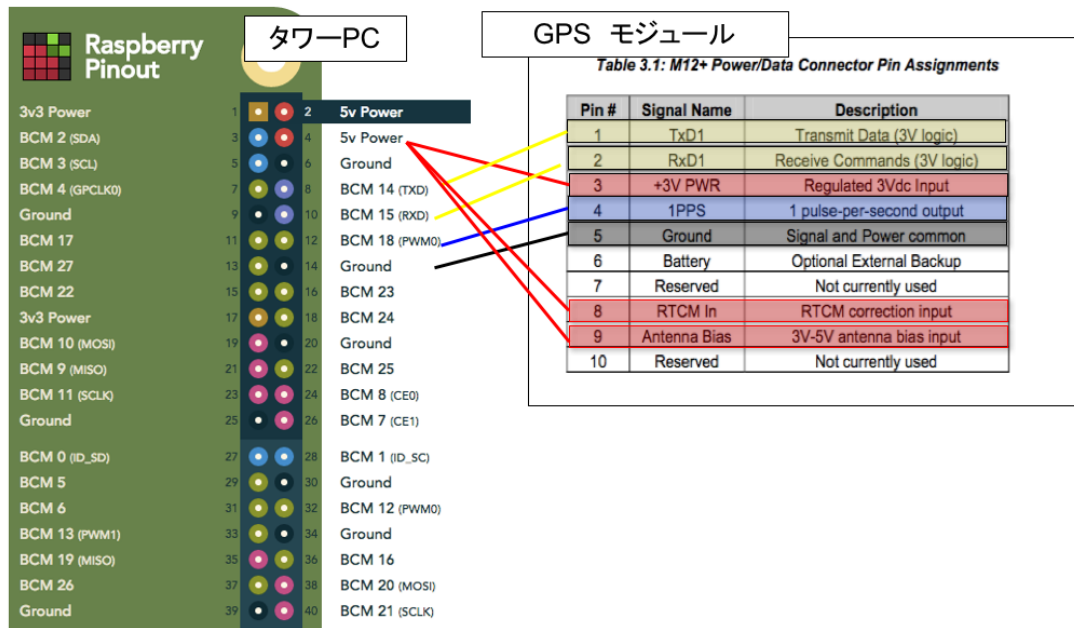


図 4.7: タワー PC と GPS モジュールの接続ピン

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、戻り値には、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 : `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、レッドパインの 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 アドレス等) 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分だけ通信確立要求を再送する。その間 `connect` 関数の戻り値は返って来ず、`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 秒後に戻り値 "-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。データ収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 : `fcntl(dstSocket, F_SETFL, O_NONBLOCK)`
- select 関数 : `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。この 4 DAQ サイクル分通信できない問題は完全には解決できていないが、現在 SD エレクトロニクス内のファームウェアを書き換えることによって、通信できない時間を 1 DAQ サイクル分に縮めることには成功している。4 DAQ サイクル分通信できない問題に関しては次の 5 章で説明する。なお、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。

- write 関数 : `write(dstSocket, buf, n)`

write 関数はデータを送信するための関数で、レッドパインの 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 : `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 : `close(dstSocket)`

close 関数はコネクションを切断するための関数で、レッドパインの 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 と SD 間の通信について簡潔にまとめると以下ようになる。

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 からコネクション待ち受け状態の 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。
4. SD エレクトロニクスは”AT+RSL_READ”という文字列と共にデータを受信する。そして SD エレクトロニクスは受け取ったデータからタワー PC からの要求を読み取り、それに対応するデータを Send コマンドにより送信する。
5. read 関数によって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したと判断する。
6. SD エレクトロニクスは”AT+RSL_CLOSE”という文字列を受信し、コネクションが切断されたと判断すると、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 サイクルを行う。

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 と通信するときのプロセス、host.c には前節で述べた関数を使用した通信のためのプロセス、sd_idcode.c にはアレイ内の SD のロジカルアドレスとボード ID と IP 番号、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。実行形式のファイルは、”sendcmd”(make sendcmd による)と”daq”(make daq による)の二つである。

”sendcmd”は SD に対して自由に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 と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。例えばタワーにおいてユーザーコマンド”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を見て、そのコマンドコードに応じた動作をする。2017 年 1 月現在実装しているユーザーコマンドは以下である。

- 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”)
- 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”)
- 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”)
- 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_idcode.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 4.8 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 SD に送信する。これが波形探査命令になる。波形探査の結果は、この波形探査命令の次の秒の”0505”コマンドの返信データの中の波形探査結果に反映される。もし波形探査の結果、波形が見つかった場合は、波形送信命令のコマンドである”0502”を SD に送信し、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)	
ボード 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)	(x): x byte

図 4.8: 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、紫の部分はコマンドコードによって内容が変わる。チェックコード、Rseq は現在使用していないので0が格納されている。

第5章 TALE-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-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 モジュールをレッドパインに交換し、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)。またレッドパイン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 に現行のデータ収集システムと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、1st term 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、2nd term では TALE アレイの 14 台+18 km 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。

	現行	新規
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独自の通信プロトコル	TCP/IP通信プロトコル
その他		アクセスポイントが必要
概略図		

図 5.1: 現行のデータ収集システムと新規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-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 モジュールをレッドパインに交換し、SD エレクトロニクスのファームウェアを新規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-SD アレイのマップを示す。

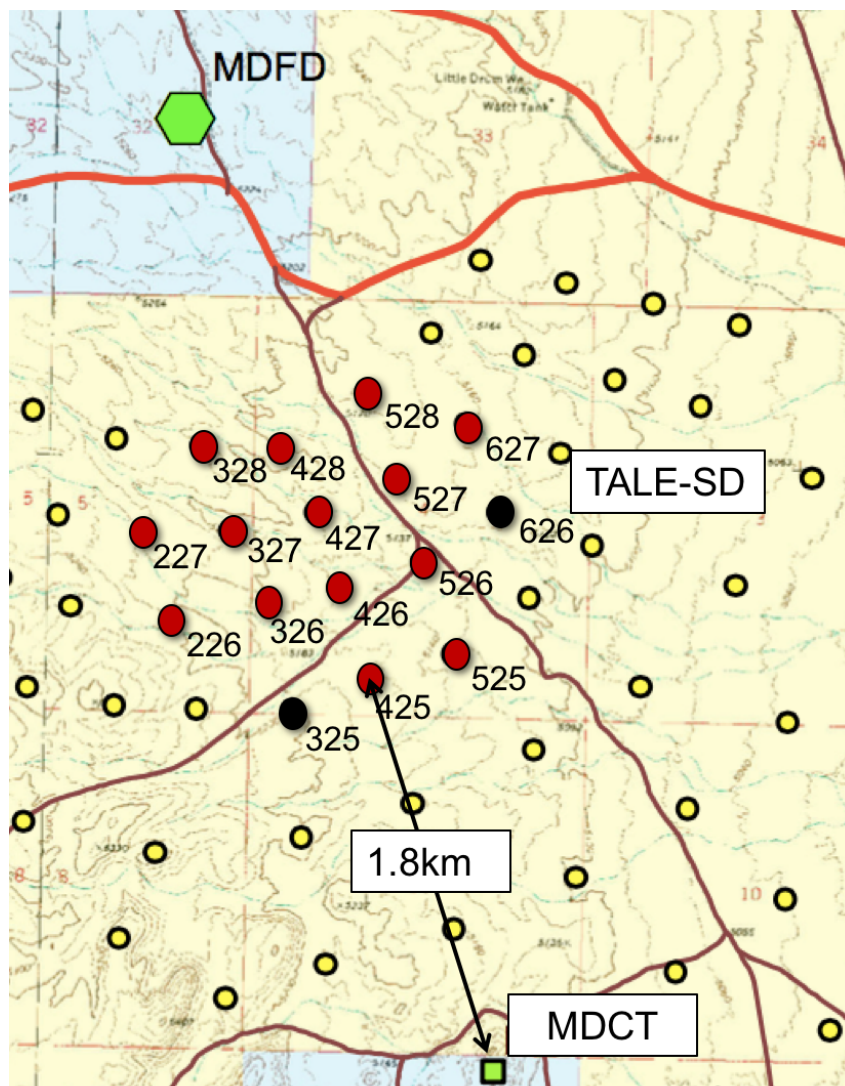


図 5.2: TALE-SD アレイ。赤丸の検出器を今回テストで使用した。黒丸は SD エレクトロニクスを大阪市立大学に持ち帰っていたために今回の試験では使用できなかった SD、黄丸はその他の SD の設置ポイント。数字は SD のロジカルアドレスである。

TALE 実験で使用するタワーは MDCT(Middle Drum Communication Tower) である。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。

このテストの際は、アクセスポイントへの給電のために、AC入力のPoE電源供給機(Cisco社製Power Injector AIR-PERINJ1500-2)を使用した。タワーには12VDC出力のバッテリーしかないので、PoE電源供給器への給電には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。さらに、タワーPCにもポータブルバッテリーの出力をAC-DC変換して給電した。なお、タワー備え付けの12VDC出力のバッテリーからDC-AC変換器を通してポータブルバッテリーに充電した。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より、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。すなわち新規データ収集システムで、最低でも10km離れたSDと通信できる必要がある。よって2nd termでは、18.2km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-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つもりをしていたが、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たことでDET1818のRSSI値は"-86dbm"から"-84dbm"に上がった。このことから、少なくともRSSI値が"-86dbm"程度になると通信に障害が出だすのではないかと考えている。

5.2 運用試験の結果と、その後のアップデート

1st term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秒分行なった。

2nd term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秒分行なった。2nd term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。そして、通信エラーの原因を究明するために、DET0627とDET0528の無線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)を交換した。

5.2.1 タワーPCの稼働状況

1st term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

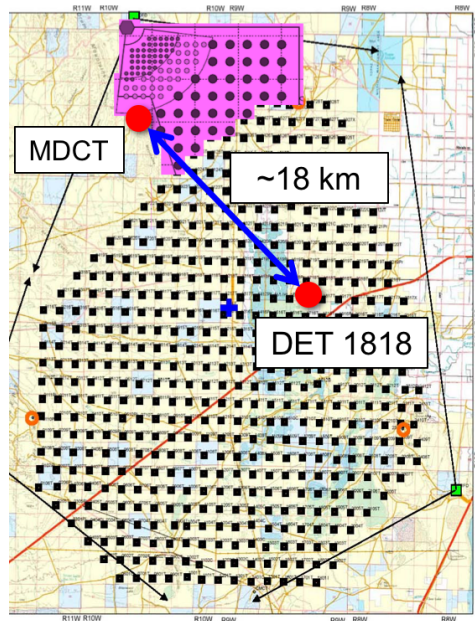


図 5.3: MDCT と DET1818 の位置。紫の領域は TALE-SD アレイである。

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が止まるという問題も生じなかった。なお、1st term ではレベル 2 トリガーは 4927 回発行された。

2nd term でも 1st term 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、2nd term 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

1st term 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”Commerr/10min”は 10 分間 (計 600 回) の通信のうち、何度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、1st term および 2nd term 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 1st term 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、2nd term 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 2nd term の後に DET0627 の無線 LAN アンテナをより指向性

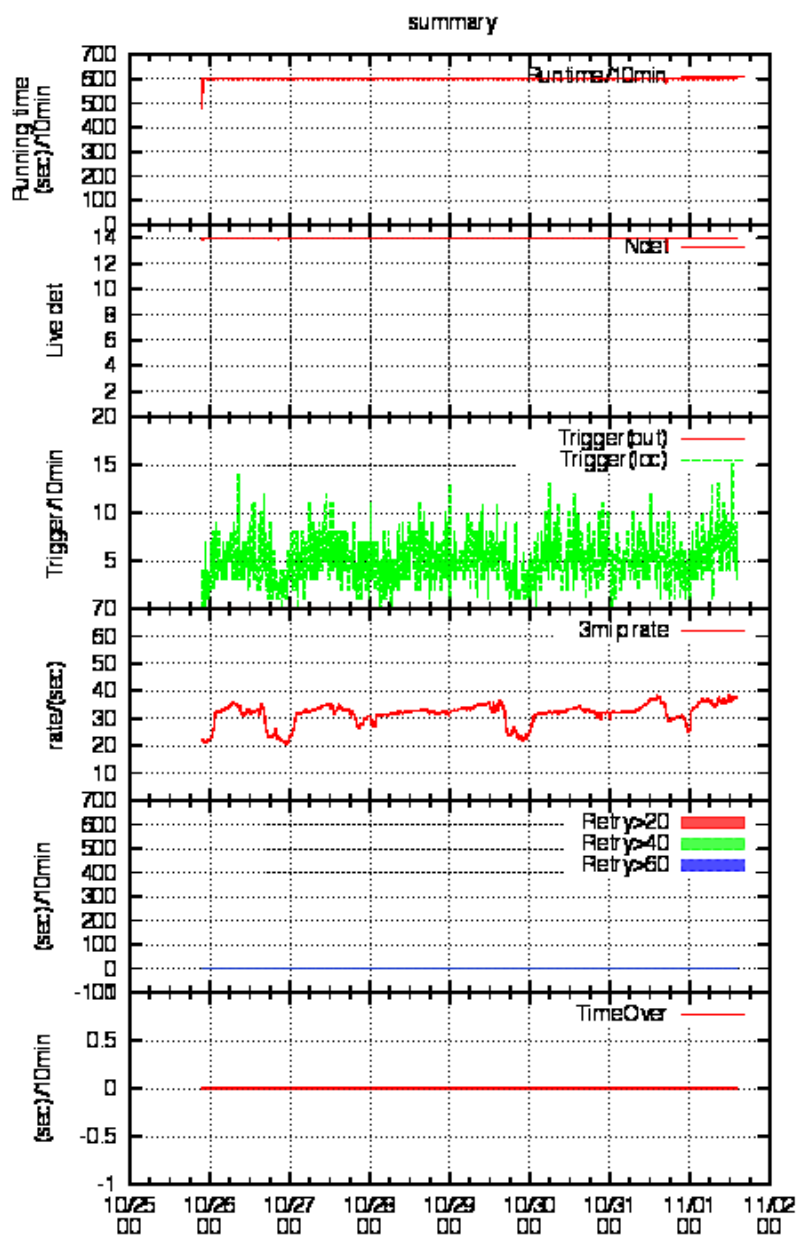


図 5.4: 1st term におけるアレイ全体のモニターデータ。上から稼働状況、稼働している SD の台数、レベル 2 トリガーレート、アレイ内の SD のレベル 1 トリガーレートの平均値、リトライ回数、タイムオーバーを表す。

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、現行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、現行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、新規データ収集システムではリトライ通信を実装していない。リトライ通信に成功すると”Commerr/10min”にはカウントされない。DET0326 および DET0627 の通信エラーが多い理由は現在明らかになっていないが、電波のマルチパスの影響や、レッドパインと相性の悪い 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。

2nd term 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 100 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	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)

表 5.1: 14 台の TALE-SD および 18.2 km 離れた TA 用の 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くなる。RSSI 値が 10 違うと、受信電波強度は 100 倍違うことになる。これらの RSSI 値はレッドパインのコマンド”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。

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

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。しかし、タワー PC およびアクセスポイント

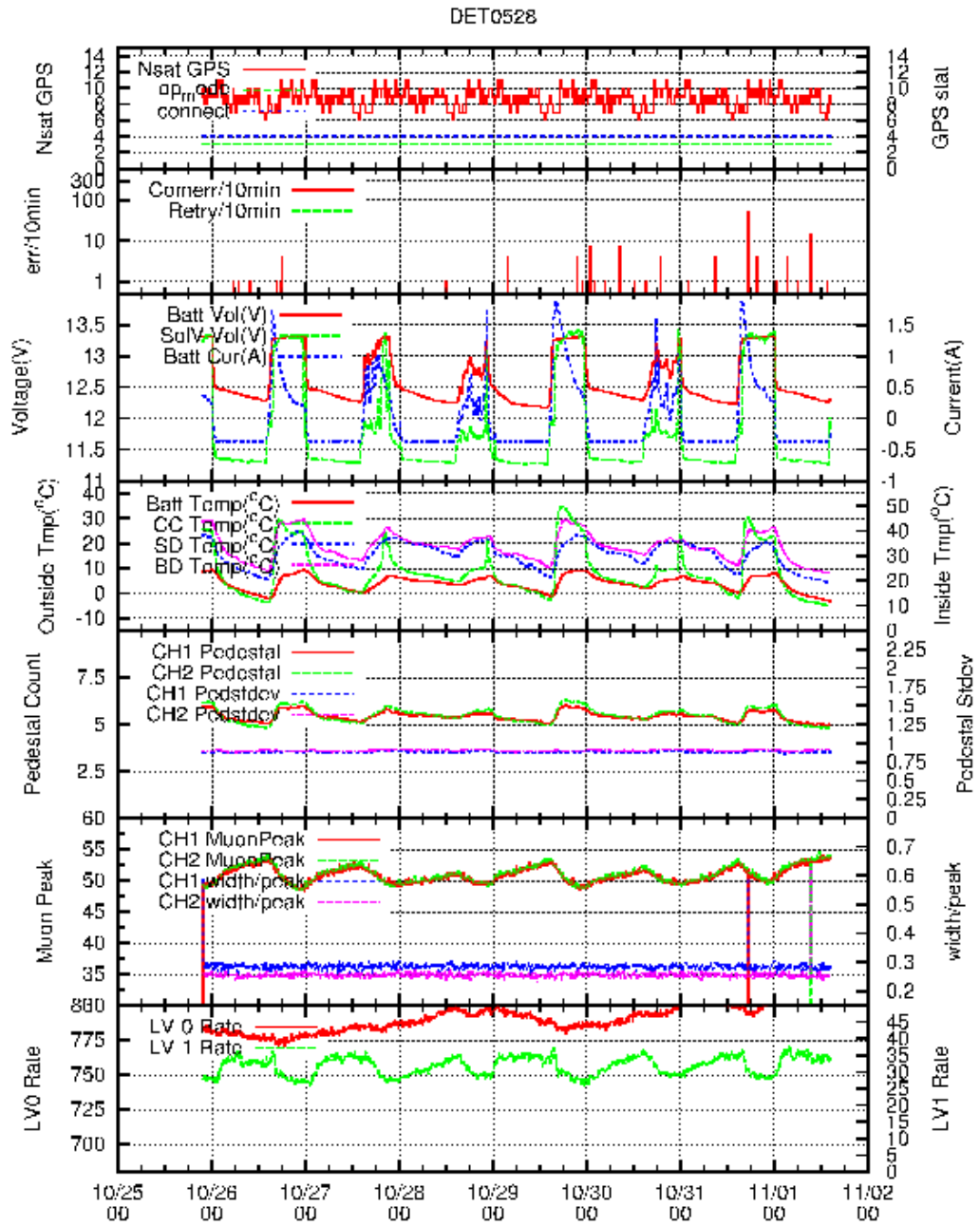


図 5.5: 1st term で取得した DET0528 のモニターデータ。上から、通信できている GPS 衛星数と GPS の状態、10 分間の通信エラー数とリトライ通信数、各種電流・電圧、各種温度、ペDESTAL とその標準偏差、1 MIP ピークと幅、トリガーレートを表す。

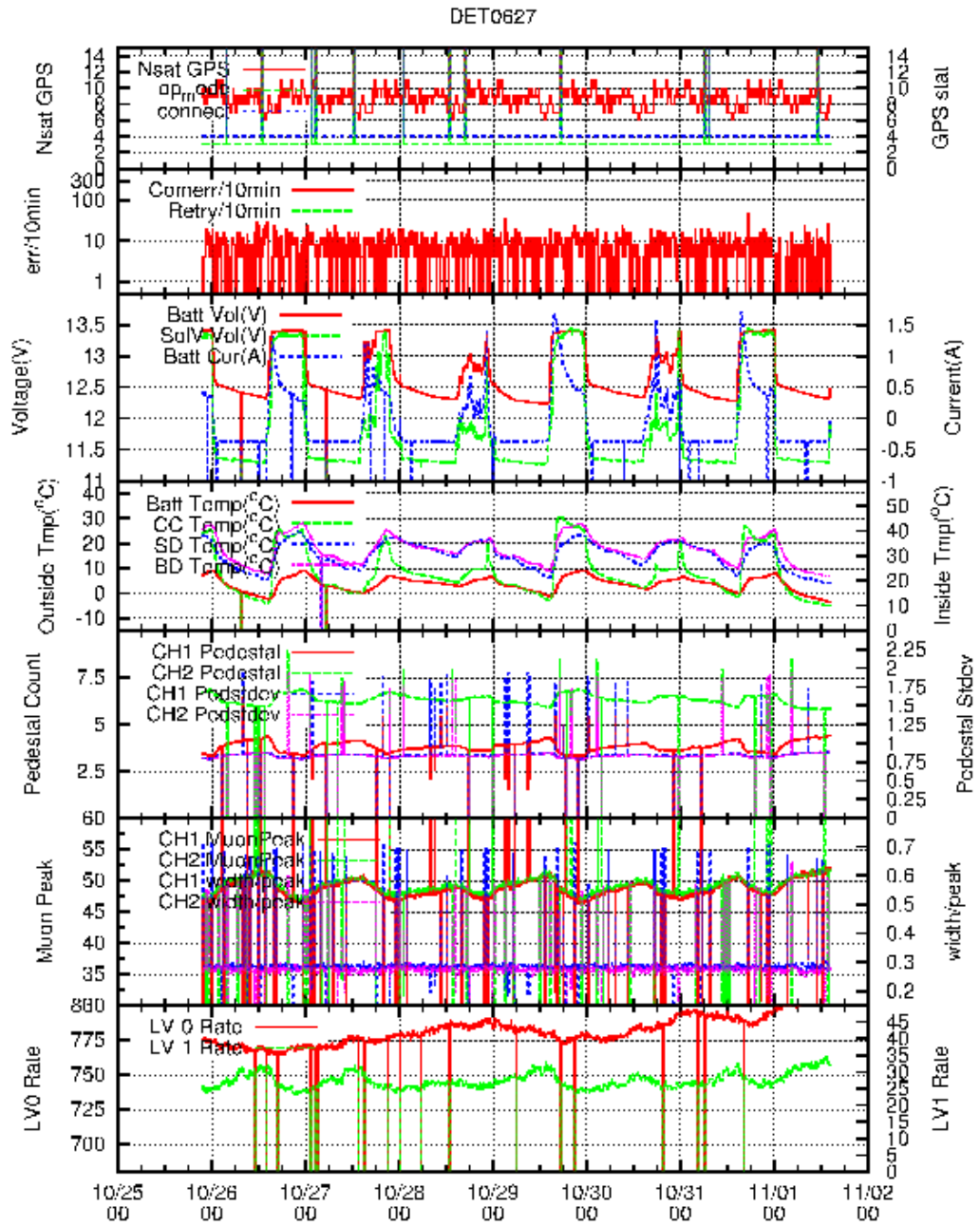


図 5.6: 1st term で取得した DET0627 のモニターデータ。上から、通信できている GPS 衛星数と GPS の状態、10 分間の通信エラー数とリトライ通信数、各種電流・電圧、各種温度、ペDESTAL とその標準偏差、1 MIP ピークと幅、トリガーレートを表す。

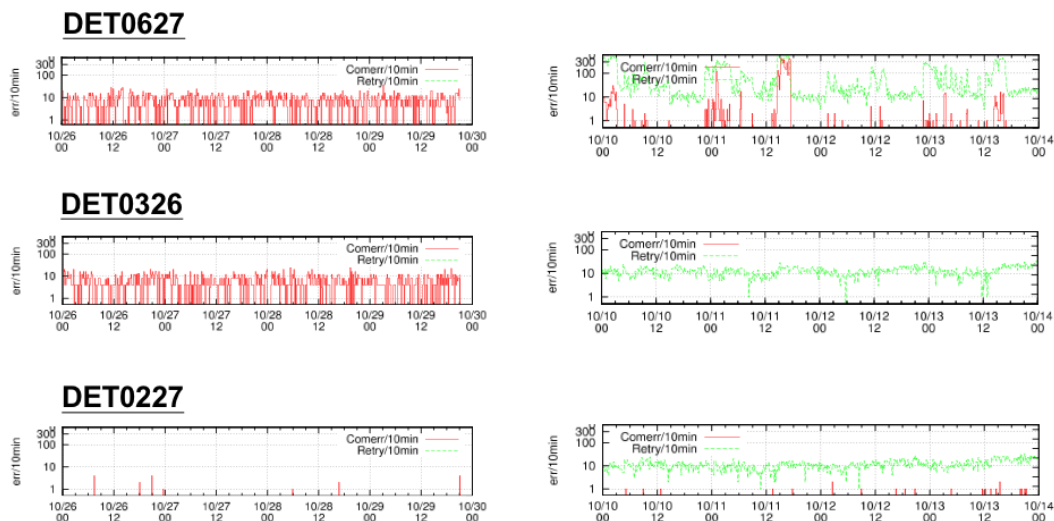


図 5.7: 通信エラーレートの比較。左が新規データ収集システムのもの、右が現行のデータ収集システムのもの。

への給電は正常に行われていたので、データ収集は継続して行っていた。この問題の対処として、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) を取り除いた。

また、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。元々タワーにはバッテリーからの 12 VDC 電源しか存在しない点と、消費電力が一番小さい点より、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。タワーのバッテリーからの 12 VDC をシガーソケット経由で PD-9501GO/12-24VDC に給電する。タワー PC に関して Tower 備え付けのバッテリーからの 12 VDC を DC-DC 変換器を通して給電する。図 5.9 は最終的なタワーのセットアップである。

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

5.2.4 SD1 台との通信に要した時間

タワー PC は、「トリガー DAQ サイクル中にアレイ内の全 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要した合計時間」を毎秒計測している。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 5.10 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) で割って求めている。図 5.10 からわかるように SD1 台に対して約 10 ミリ秒あれば十分であることがわかった。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、この部分に使える時間は 1 秒のうちのおよそ 800 ミリ秒と見積もることができる。ここで、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。よって新規データ収集システムでは、1 台のタワー PC で 80 台 (≒ 800 ms

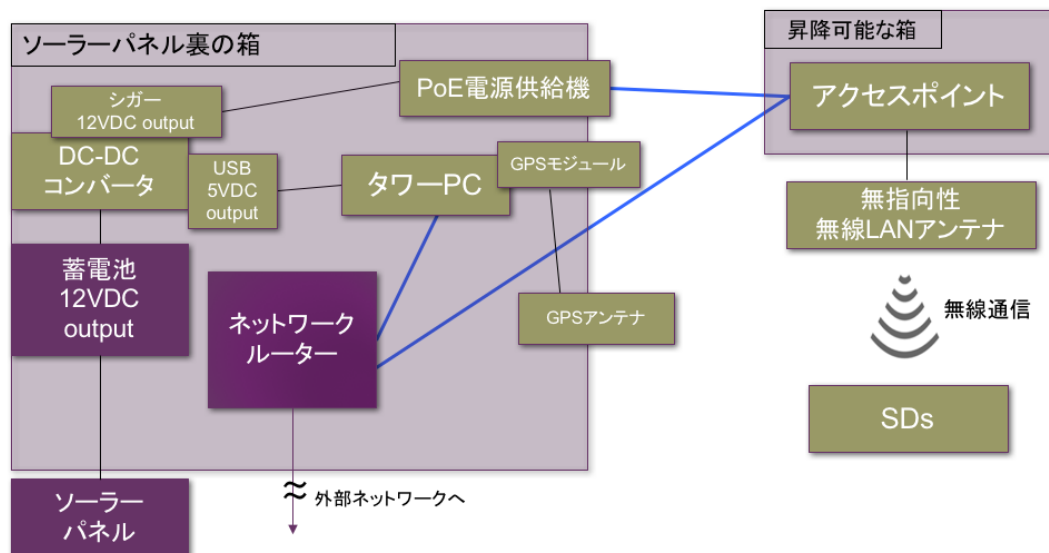


図 5.9: TALE-SD アレイのための新しいタワーのセットアップの概略図。青線は LAN ケーブル、黒線はその他のケーブルを表す。

×(1 SD / 10 ms)) の SD とデータ収集ができることがわかった。しかし、TALE-SD は合計 103 台設置する予定である。そこで、103 台の SD 全てを使ってデータ収集をするために、いくつかアイデアがある。

一つは DAQ の高速化である。レッドラインと FPGA 間のホストフェースを SPI に変更することによって DAQ を高速化できると考えており、現在この開発が大阪市大で進められている。レッドラインと FPGA 間の通信速度は UART では最大 921,600 bps しか実現できないのに対して、SPI ではその約 25 倍である 25,000,000 bps まで実現可能である。そして、SD1 台との通信時間 (約 10 ms) のうち、UART では計算上このレッドラインと FPGA 間の通信部分に約 3.5ms ほどの時間がかかっていると考えられるため、SPI に変更すれば 3ms 以上短縮できるのではないかと考えられる。他にも通信方式を TCP/IP から UDP/IP に変更するというアイデアもある。

また、タワー PC を複数個使用するというアイデアもある。1 つのアクセスポイントに 2 つのタワー PC を接続し、TALE アレイを 2 つの部分アレイに分ける場合は、両部分アレイがフル稼働しても電波干渉をしないか、もしくはアクセスポイントがビジー状態にならないのかということが問題になる。実際に 14 台の SD アレイを 7 台ずつの部分アレイにわけて、1 台のアクセスポイントに 2 台のタワー PC を接続し、データ収集をしたところ、通信エラーが極端に増えてしまった。さらに、データ収集中に使用されているアクセスポイントを使用して、データ収集とはまた別に大容量のデータを通信させると、データ収集の通信エラーレートが跳ね上がってしまうこともわかっている。しかし、4.1.1 節で述べたようにアクセスポイントは 2 本の無線 LAN アンテナを使用することを推奨されているのに対して、今回は 1 本の無線 LAN アンテナしか使用していない。よって無線 LAN アンテナを 2 本にすれば、可能になるかもしれない。また、それでも無理な場合は無線 LAN アクセスポイントを 2 台使用する。

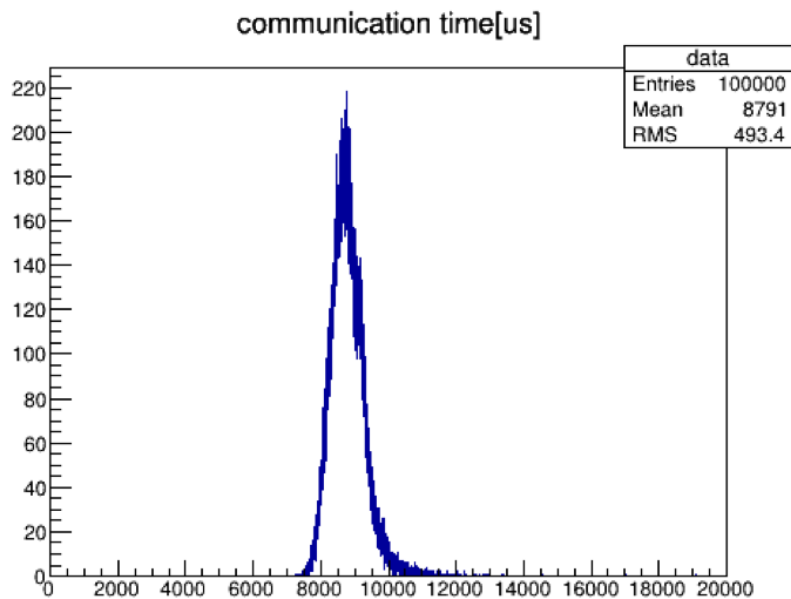


図 5.10: データ収集の際に SD1 台あたりの通信に要した時間 [μs] のヒストグラム。

5.2.5 運用試験後のアップデート

TALE サイトで実施し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 つ目はコネクションは確立できたが、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、2 つ目は 4 DAQ サイクル分通信できなくなるものである。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 エレクトロニクスの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。

リトライ通信について

新規データ収集システムでは、データ収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、現行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。新規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ので、センスが悪い。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。

以上の理由から新規データ収集システムではリトライ通信を実装せず、後述する「リカバリー通信」を実装することにした。

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)

TALE サイトでの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る。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込んでいるからである。そこで、SD エレクトロニクスは、データ取集中には必ず 1 秒周期でタワー PC と通信している、すなわち 1 秒周期で”AT+RSL_CLOSE”を必ず受信するという仮定に乗っ取り、1.2 秒間”AT+RSL_CLOSE”を受信しなければハーフコネクション状態だと判断することにした。そして SD エレクトロニクスはハーフコネクション状態だと判断すると、Socket クローズコマンドおよび TCP リッスンコマンドを実行することでハーフコネクション状態から復帰する。しかし、仮になんらかの理由でトリガー DAQ サイクルが少し遅れ、タワー PC から通信確立要求がくるタイミングや、データ通信中などのタイミングで 1.2 秒を迎えてしまうと、コネクションを SD エレクトロニクス側から切断してしまうために、これまでに存在しなかった通信エラーを招いてしまう恐れもある。実際、4.2.3 節(タワー PC と SD 間の無線通信)の”2”終了後から”5”までの間に SD エレクトロニクスが Socket クローズコマンドおよび TCP リッスンコマンドを実行してしまうと、”5”の read 関数の返り値に 0 を返し、タワー PC は SD からデータを受信できない。だが、こういった場合は次に説明する「リカバリー通信」によって対応できると考えている。

なおこれにより、これまで 4 秒続けて通信エラーになっていたものが 1 秒間のみの通信エラーになるので、図 5.1 で示した通信エラーレートが少なくとも半分程度になると期待される。

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 2.17 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。

第6章 TALE実験の現状とその性能

TALE 実験の SD は 2017 年 1 月現在、図 6.1 のように 400m 間隔の領域と 600m 間隔の領域の一部に合計 35 台が設置されている。さらに、そのうちの 16 台は TA 実験で使われているエレクトロニクスを用いて空気シャワーアレイとして運用されている。なお、16 台のうち 2 台は 2015 年 12 月以降、エレクトロニクスのテストのために止められている。残りの SD は 2017 年 2 月に設置し、2017 年 3 月より、今回開発された新規データ収集システムを用いて、全体で SD80 台規模でのデータ収集を開始する予定である。

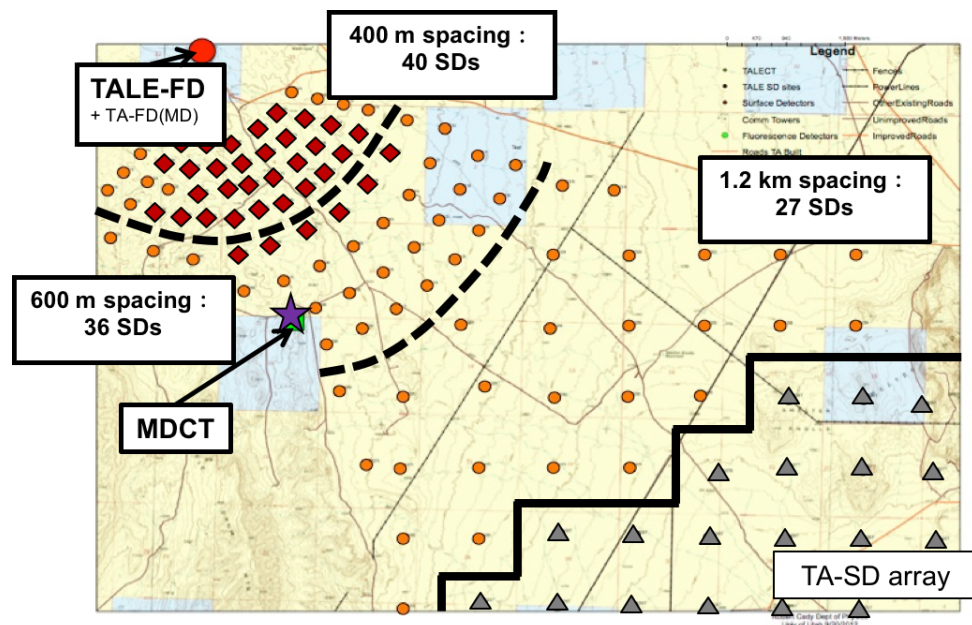


図 6.1: 赤色の点は 2017 年 1 月現在で設置されている SD の設置点を示す。

図 6.2 の上のグラフは TALE タワーの稼働率で、一時的に稼働していない時期も存在するが 2013 年 5 月から 2017 年にかけて観測を続けていることがわかる。

また、TALE 実験用 FD ステーションは 2012 年 11 月に完成しており、2013 年 2 月から観測を始めている。図 6.3 は TALE 実験用 FD と SD アレイで同時検出されたハイブリッドイベントの 1 例のイベントディスプレイである。

Tower's operational status

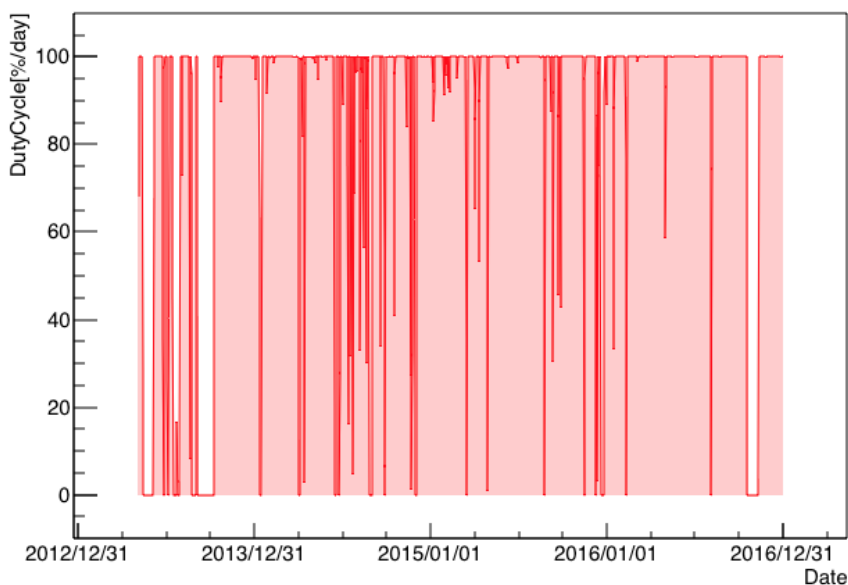


図 6.2: 2013 年 5 月から 2016 年 12 月までのタワーの稼働状況。

TALE 実験用の SD エレクトロニクスが完成すると、図 6.1 に示したように、SD は FD ステーションから 3 km 以内の領域に 400 m 間隔で 40 台、3~5 km の領域に 600 m 間隔で 36 台、そして TA アレイと接続する領域に 1.2 km 間隔で 27 台並べられる。SD が 400 m 間隔で並べられる領域では 3×10^{16} eV 以上の空気シャワーに対して 100 % の検出効率を持つ。また SD が 600 m 間隔で並べられる領域では 10^{17} eV 以上の空気シャワーに対して 100 % の検出効率を持つ。

この TALE 実験の空気シャワーアレイで期待されるイベントレートはモンテカルロシミュレーションによって計算されている [27][28]。TALE 空気シャワーアレイで期待されるイベントレートスペクトラムを図 6.4 に示す。SD トリガーの最頻エネルギーは $10^{16.5}$ eV で、トリガー頻度は年間約 50,000 事象と予想されている。

また、SD と FD によるハイブリッド観測のイベントレートスペクトラムを図 6.5 に示す。ハイブリッド観測による最頻エネルギーは $10^{17.3}$ eV で "2nd knee" があると考えられている $10^{17.5}$ eV よりも低く、年間約 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。

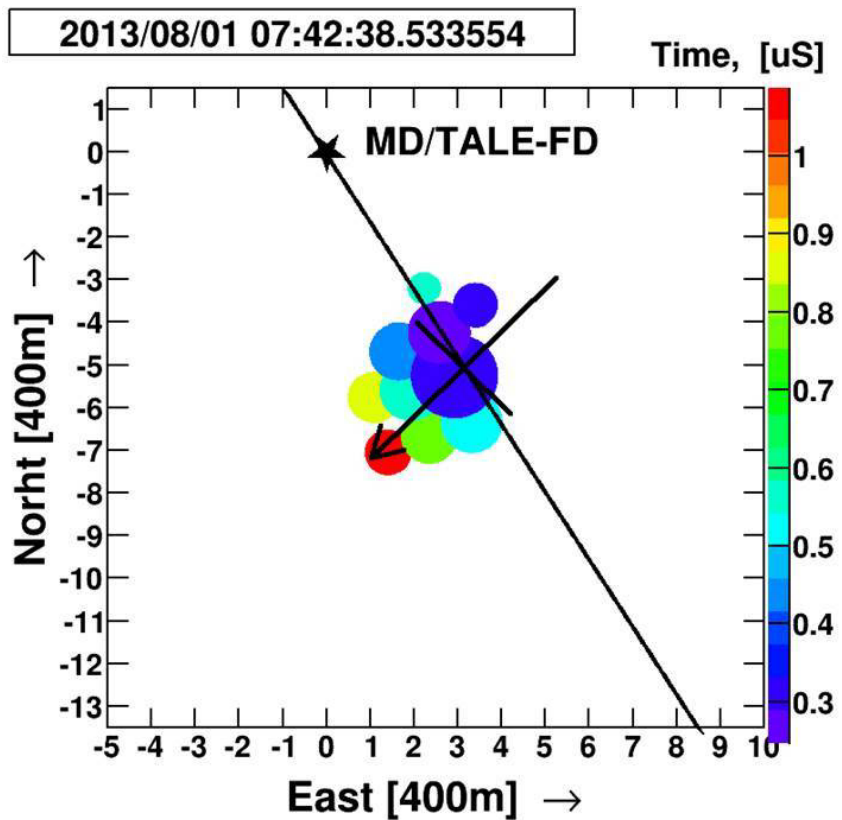
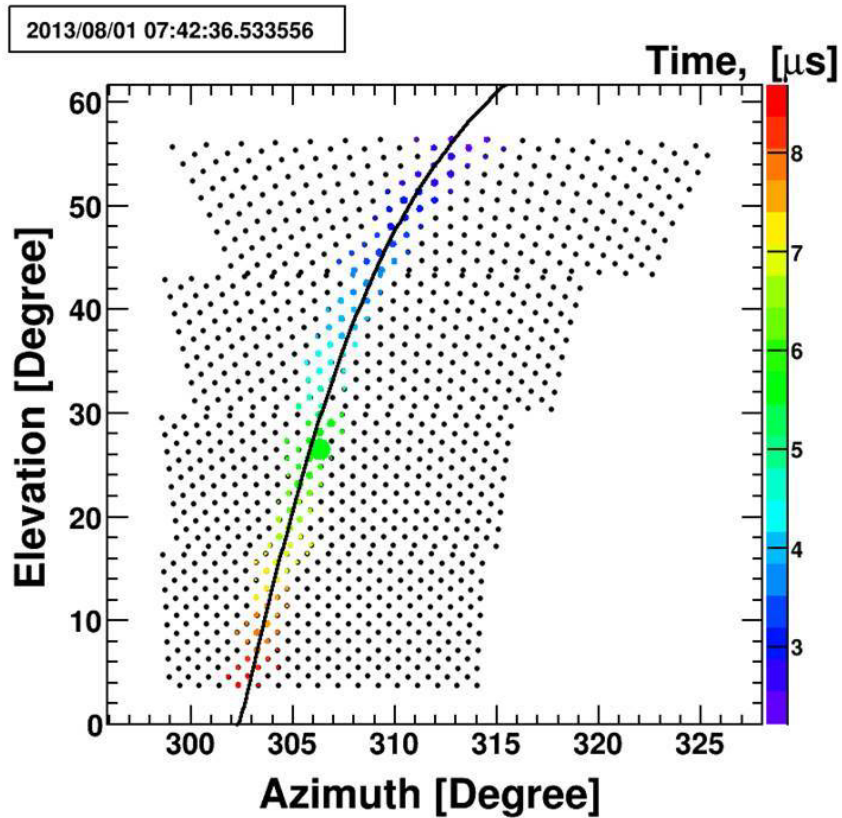


図 6.3: (上)TALE-FD によるハイブリッドイベントの 1 例のイベントディスプレイ。(下)SD による上と同じハイブリッドイベントのイベントディスプレイ。

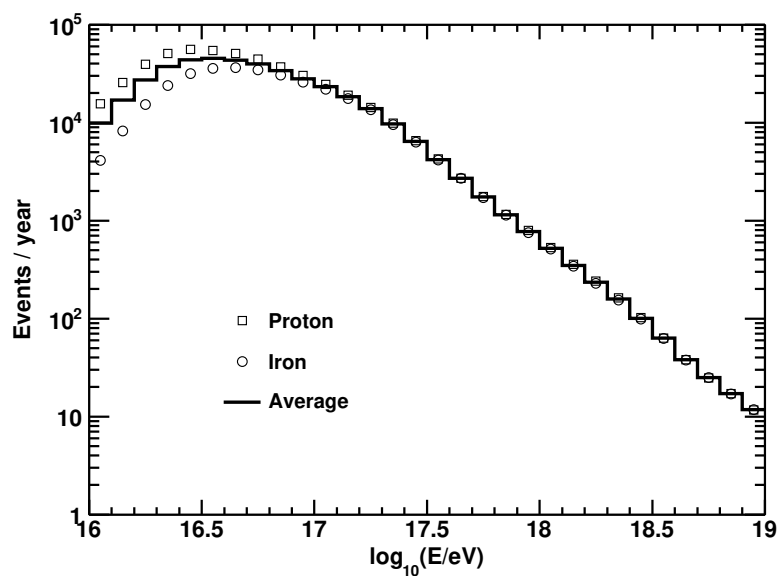


図 6.4: TALE 空気シャワーアレイによる観測で1年間に期待される一次粒子が陽子の空気シャワー (□) と鉄の空気シャワー (○) に対するトリガー数のスペクトル。Average はエネルギービン毎の陽子と鉄のプロットの平均を示している。最頻エネルギーは $10^{16.5}$ eV で、年間約 50,000 事象のイベントトリガーが期待される。

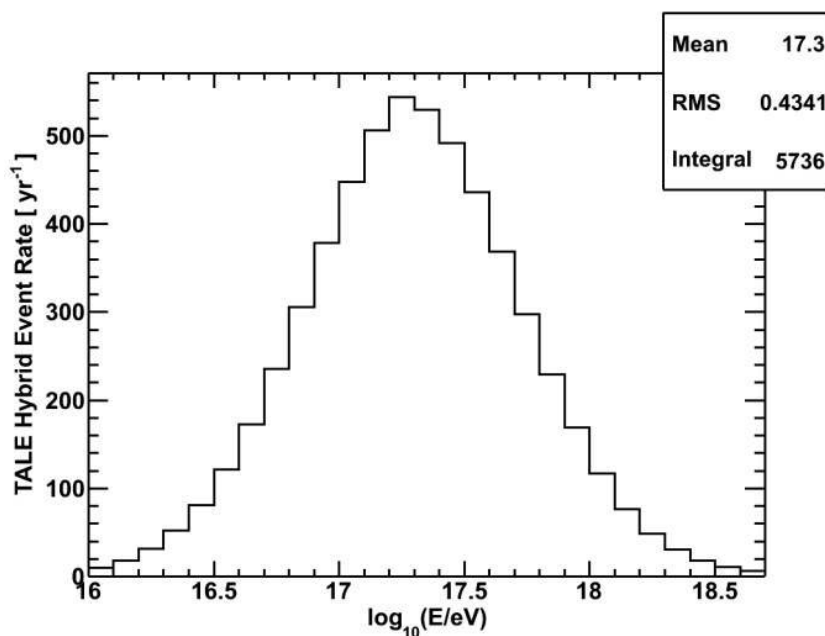


図 6.5: TALE 実験の1年間のハイブリッド観測から期待されるイベント数。

第7章 結論

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

また TALE 実験では、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 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 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 実験地表検出器アレイにて、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。

約 1 週間の運用試験の結果を見てみると、14 台中 11 台の SD の通信エラーレートは 0.05% 未満であるのに対して、1 台は 0.1% 程度、2 台は 1% 程度通信エラーを起こしていることがわかった。米国ユタ州での運用試験後、これらの通信エラーによるデータの取りこぼしを減らすためにタワー PC のソフトウェアおよび、SD エレクトロニクスのファームウェアをアップデートした。アップデート内容は、ハーフコネクション状態からの復帰とリカバリー通信の導入である。ハーフコネクション状態からの復帰を実装したことで通信エラーレートを半減できることが期待され、リカバリー通信によってデータの取りこぼしをほぼ 0% にできることが期待される。また、現状の新規データ収集システムでは、SD 1 台との通信に対して約 10 ミリ秒を要することから、1 台のタワー PC で計算上約 80 台の SD とデータ収集ができることがわかった。80 台以上の SD とデータ収集をするために、DAQ の高速化とタワー PC を 2 台使用するという考えがある。DAQ の高速化に関しては、FPGA と無線 LAN モジュール間のホストインターフェースを UART から SPI に変更することで実現できることが期待され、現在開発が進んでいる。

他にも、約 1 日間長距離通信試験を実施し、TALE 実験の最長通信距離である 10 km よりも十分に長い 18 km でも通信エラーレート 0.3% 程度で安定したデータ収集ができることがわかった。

TALE 実験用新規データ収集システムを使用し、TALE 検出器を完成させると、SD トリガーの最頻エネルギーは $10^{16.5}$ eV で、トリガー頻度は年間約 50,000 事象と予想されている。SD と FD のハイブリッドトリガーの最頻エネルギーは $10^{17.3}$ eV で “2nd knee” があると考えられている $10^{17.5}$ eV よりも低く、このエネルギーで年間約 5,000 事象のトリガー数が期待される。

謝辞

本研究に携わる機会を与えて頂き、研究を進めるにあたっては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林嘉夫名誉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常定芳基准教授、Bokkyun Shin 博士、東京宇宙線研究所の榊直人博士に深く感謝致します。

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致します。

東京大学宇宙線研究所の竹田成宏助教にはユタでの観測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致します。

新型SDエレクトロニクスの開発を共に行った大阪市立大学の小西翔吾氏には、SDエレクトロニクス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致します。

新型SDエレクトロニクスの開発を共に行った大阪市立大学の佐原涼介氏には、毎日の研究生生活の中で常に良い刺激を与えていただき、ユタでの運用試験の際にも大変お世話になりましたことを深く感謝致します。

東京大学地震研究所の山崎勝也博士、大阪市立大学の西本義樹氏、和知慎吾氏には毎日の研究生生活の中で研究に関することのみならず多くの相談に応じて頂き、ご助言を頂きましたことを深く感謝致します。

毎日の研究生生活の中で支えとなって頂きました大阪市立大学の大野木瞭太氏、岸上翔一氏、Rosa Mayta Palaciosさん、佐原涼介氏、高木芳紀氏、織田浩行氏、尾村勇吾氏、藤田慧太郎氏に感謝致します。

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、川田和正博士、Heungsu Shin 博士、武石隆治氏、神奈川大学の有働慈治助教、多米田裕一郎助手、信州大学の富田孝幸助教、埼玉大学の井上直也教授、近畿大学の千川道幸教授、徳島大学の櫻井信之講師、大阪市立大学の技術職員の松山利夫氏には数多くのご助言を頂きましたことを感謝致します。

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、Cindy Barrさん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致します。

大阪市立大学の川口幸子さん、大鶴淳美さん、東京大学宇宙線研究所の木次敦子さん、千田藍さん、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多くの事務処理を行って頂きましたことを感謝致します。

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。関係機関の皆様に感謝致します。
最後に、研究生生活を支えてくれた家族、友人に深く感謝致します。

参考文献

- [1] M. Nagano, *New J. Phys.*, **11**, 065012(2009).
- [2] 日本物理学会誌 *Vol.71, No 41, 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, http://www-ik.fzk.de/KASCADE_home.html(2017/01 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] T. Abu-Zayyad et al., *Astroparticle Physics*, 61, pp. 93-101(2015).
- [23] R. Abbasi et al., *Astroparticle Physics*, 64, pp. 49-62(2015).

- [24] 米田泰久, 修士論文 大阪市立大学 (2013).
- [25] 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)
- [26] W.M. Yao, et al., *J.Phys.G. and Nucl.Phys.*, **33**(2006).
- [27] S. Ogio, et al., Proc. of 33rd ICRC, 0717(2013).
- [28] S. Ogio, et al., EPJ Web of Conference **53**, 08020(2013).
- [29] 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).
- [30] 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).
- [31] 後藤昂司, 修士論文 大阪市立大学 (2014)
- [32] 小西翔吾, 修士論文 大阪市立大学 (2016)