GRS 1915+105の広帯域X線スペクトル解析

広島大学 理学部 物理科学科
高エネルギー宇宙研究室
B054123
本田光介
主査：副査:

2007年2月9日

目 次

第 1 章　序論 **5**

第 2 章　ブラックホールについて **6**
2.1　ブラックホール連星について 6
2.1.1　ブラックホールとは 6
2.1.2　ブラックホール連星 7
2.2　ブラックホール連星の X 線放射スペクトルの特徴 7
2.3　ブラックホールからの X 線放射モデル 8
2.3.1　Disk black body 8
2.3.2　熱的コンプトン散乱 9
2.4　観測天体 (GRS 1915+105) 9
2.4.1　過去の観測結果 9
2.4.2　Belloni et al 2000 による分類 10

第 3 章　観測装置「すざく」と解析方法 **13**
3.1　観測装置「すざく」 13
3.1.1　X 線望遠鏡 (X-ray Telescope) 13
3.1.2　XIS(X-ray Imaging Spectrometer) 14
3.1.3　HXD(Hard X-ray Detector) 15
3.2　解析方法 17
3.2.1　テレメトリ飽和について 17
3.2.2　pile-up について 17

第 4 章　解析結果 **19**
4.1　全観測について 19
4.2　2005 年観測について 19
4.2.1　時間変動 19
4.2.2　各状態でのスペクトル解析 19
4.3　2007 年観測について 19
4.3.1　2005 年観測との比較 19

第 5 章　テストデュワー **21**
5.1　デュワーの特徴 21
5.2　ハーメチックコネクタとの対応 22

第 6 章　まとめと今後について **24**

付 録 A MOSFET **25**

付 録 B 検出器周辺部図面 **26**

付 録 C VIRGO-2K 用クロックパターン **30**
C.1 cpg.ascii 30
C.1.1 リセット用クロック 30
C.1.2 読み出し用クロック 32
C.2 spv.ascii 34

表 目 次

3.1 「すざく」に搭載されている観測機器の概要 16

5.1 40 ピンコネクタ、ハーメチックコネクタ対応番号 23

図 目 次

2.1 典型的な state A/B/C を示した color-color diagrams 10
2.2 12 の class の color-color diagrams と light curve の一例。(Belloni et al 2000. より)。 11

3.1 「すざく」の外観 13
3.2 XRT の外観 (左) と配置図 (右)(The Suzaku Technical Description より) 14
3.3 XIS の外観 (The Suzaku Technical Description より) 14
3.4 CCD の断面図 (東海林雅之 修士論文より) 表面照射型 CCD(左) と背面照射型 CCD(右) を模式的に示したもの 15
3.5 HXD の外観 (The Suzaku Technical Description より) 15
3.6 HXD の構造 (The Suzaku Technical Description より) 16
3.7 中心から 30pix,60pix,90pix,120pix でイメージを切りぬいたスペクトル 18

4.1 上図:swift 衛星, 下図:RXTE 衛星による長期 light curve。青枠は、今回解析に使用した時間帯。(2005 年 10 月 16 日 ~ 10 月 18 日, 2007 年 5 月 7 日 ~ 5 月 9 日) 横軸は time(MJD), 縦軸は count rate。 20

5.1 ラジエーションシールド 21
5.2 温度コントロールステージ 21
5.3 温度コントロールステージ上の温度センサー 21
5.4 ラジエーションシールド側面の温度センサー 21
5.5 ラジエーションシールド底面部の温度センサー 22
5.6 ラジエーションシールド外側底面部のヒーター 22
5.7 40 ピンコネクタのピン配置 22

A.1 エンハンスメント型 n-MOSFET 25

B.1 プリアンプ・ドライバ回路図 27
B.2 ADC ボードピン番号 28
B.3 バイアスボードピン番号 29

第1章　序論

ブラックホールとは、Einstein の一般相対性理論に基づき得られた概念で、物質がみずからの重力で崩壊し、その周りに光さえも脱出出来ない境界を作る高密度天体のことをいい、その中心には特異点をもつ。ブラックホールを形成するには、物質をシュヴァルツシルト半径と呼ばれるある大きさまで縮めなければならない。シュヴァルツシルト半径は天体の質量に比例しており、例えば、地球の質量に対しては半径約 5mm, 太陽は半径約 3km となる。星の進化の最終段階では、内部の核融合反応が終わり重力のみが働いて星は重力崩壊を起こす。このときの星の質量が $30M_{\odot}$ 以上ならば、ブラックホールになると予想されている。今日、このブラックホールという言葉が出来てからまだ 40 年ほどしか経っていないが、電波、可視、赤外、X 線など様々な波長での研究が行われてきた。。ブラックホールが単体で存在しているときは観測することができないが、別の恒星と連星系を成しているときは降着円盤を形成し、そこから放射する X 線、γ 線、宇宙ジェットを観測することが可能である。降着円盤の中心付近の もっとも高温の部分からは X 線が放射されると考えられている。今まで、「すざく」など 日本の X 線衛星では多くのブラックホール連星を観測してきた。これら の観測 により、ブラックホール連星は軟 X 線成分が卓越した high/soft state , ハード 成分が強い low/hard state の 2 つのスペクトル状態をもつことが明らかに なり、 さらに RXTE などの衛星により非常に明るい時期に見られる very high state とよ ばれる状態も見つかった。今回私が研究を行った GRS 1915+105 という天体は非 常に明るく常に very high state の状態にある。GRS 1915+105 のスペクトルにつ いては、さらに 3 つの state に分類することができ、天体はこの 3state 間を状態 遷移している (Belloni et al. 2000)。本研究は X 線天文衛星「すざく」に搭載 されている XIS, HXD のデータを使い、この天体の 2005 年, 2007 年の X 線スペクト ル解析を行った。2 章では、一般的なブラックホール連星の特徴と GRS 1915+105 の過去の観測結果について述べる。3 章では本研究で用いた観測衛星「すざく」 についてと解析方法について説明している。4 章では実際の解析結果を述べ、最後に 5 章で今回の結果をまとめる。

第2章　ブラックホールについて

2.1　ブラックホール連星について

2.1.1　ブラックホールとは

ブラックホールという概念は一般相対性理論により初めて予言された。質量 M の質点が半径 r の位置に作る重力場 g は、重力定数を G として、

$$g = -\frac{GM}{r^2} \tag{2.1}$$

で表される。重力ポテンシャルは $-GM/r$ となり、このポテンシャルの下で無限遠から質点 m が落下するときの速度は $v = \sqrt{2GM/r}$ である。速度は中心に近づくにつれて増大し、シュバルツシルト半径と呼ばれる値

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} = 2.9(\frac{M}{M_\odot})[km] \tag{2.2}$$

で光速度 c に達する。アインシュタインの特殊相対論によれば、質点の速度は光速度を越えることができないために、r が R_s に近づくと式 (2.1) は成り立たない。その状況を正確に扱うことに成功したのが同じアインシュタインによる重力と時空を関係づける理論の一般相対論である。その基本方程式であるアインシュタイン方程式は次のようになる。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \tag{2.3}$$

$R_{\mu\nu}$ は、リッチテンソル、R はスカラー曲率、$g_{\mu\nu}$ は計量テンソル、$T_{\mu\nu}$ はエネルギー運動量テンソルで、Λ は宇宙項と呼ばれるものである。左辺の 1 項、2 項は時空の曲がり具合を表し、右辺は物質のエネルギー分布を表す。1916 年に $\mathrm{Karl\ Schwarzschild}$ がこのアインシュタイン方程式を用いて、質点まわりの周囲の空間のメトリックを等方的で真空という条件で解いた。

$$ds^2 = -(1 - \frac{R_s}{r})dt^2 + (1 - \frac{R_s}{r})^{-1}dr^2 + r^2d\theta^2 + r^2sin^2\theta d\phi^2 \tag{2.4}$$

この解をシュバルツシルトの真空解といい、このメトリックを用いて光の運動を解くと、物質を収縮させてシュバルツシルト半径 R_s 以下にするとそこからは光さえも出ることができないということが分かる。よって質量 M の物体がシュバルツシルト半径より小さく縮められるとそれはブラックホールとなり、その中心には密度と時空の歪みが無限大かつ体積がゼロの「特異点」が存在すると考えられている。

2.1.2　ブラックホール連星

星の進化の最終段階では内部の核融合反応が終わり、重力のみが働き星は重力崩壊を起こす。このときの星の質量が $30M_{\odot}$ 以上であるならばブラックホールが形成されると考えられている。ブラックホール単体ではほとんど光っていないが、別の恒星と連星系を成しているときは相手の星の物質がブラックホールの重力につかまって落ちていき、降着円盤が形成される。そして、降着円盤内の物質が中心に向かってゆっくりと落ちていくときに重力エネルギーが解放され、強い X 線が放射される。この放射は、物質の降着率に依存しており降着率が高いほど明るく光る。

2.2　ブラックホール連星の X 線放射スペクトルの特徴

一般的なブラックホールは、ハード状態とソフト状態という 2 つの典型的なスペクトルの状態をもつ。ハード状態は、質量降着率が低くて X 線光度がエディントン限界光度の数%未満のときに出現する。この状態のブラックホール連星は、高エネルギー側が卓越した硬いスペクトルを持つ。そして質量降着率が上がり、X 線光度がエディントン限界光度の数%を越えるとソフト状態へ遷移する。~10keV 以下の軟 X 線領域で、強い超過成分が出現し、軟いスペクトルを示す。

- high/soft state
  high/soft state とは、質量降着率が高く soft なスペクトルをもつ状態のことをいう。この状態は、1970 年に代初頭に確立した「標準円盤モデル」というモデルでよく再現される。これは、ガス降着に伴って解放された重力エネルギーが効率よく放射エネルギーに転化され、円盤は明るく光るというモデルである。放射でよく冷えるため圧力が下がり、円盤は面に垂直方向に縮んで幾何学的に薄くなる。円盤中のガスは、中心天体の周りを高速回転しながらゆっくりと中心天体に向かって落ちていく。スペクトルの soft 成分は、降着円盤からの熱的放射と考えられており、さまざまな温度の黒体放射スペクトルの重ね合わせとなる。これは Multi-Color Disk モデルと呼ばれている。また、hard 成分の起源はよく分かっていないがブラックホール周りにあるとされる薄い超高温プラズマによって soft 成分の一部が逆コンプトン散乱したものではないかと考えられている。hard 成分は power-law モデルでよく表現される。power-law モデルは次の式で与えられる。

$$A(E) = KE^{-\alpha} \tag{2.5}$$

  ここで K は normalization、つまり単位時間・単位エネルギー・単位面積あたりの放射光子数で、α は photon index と呼ばれる無次元量である。このスペクトルは log-log でとると傾き $-\alpha$ の直線になる。α が大きい場合は、スペクトルの傾きが急になり低エネルギー側の光子が多く高エネルギー側が少ない soft なスペクトルになる。一方、α が小さい場合は傾きが緩やかになりハードなスペクトルを示す。また、high/soft state の場合のべきは 2-2.5 になる。

- low/hard state
  low/hard state とは、質量降着率が低くてハードなスペクトルをもつ状態のことをいう。このとき、ブラックホールより離れたところに光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤があり、その内側は光学的に薄いプラズマのような状態になっていると考えられている。放射メカ

ニズムははっきりと分かっていないが現在有望視されているのが、放射が非効率的な降着流というモデルで「RIAF」(Rdiatively Inefficient Accretion Flow) モデルというものがある。このモデルの場合、円盤中のガスは中心に向かってらせん状に高速で落ちていく。また放射を出しにくいので放射冷却が効かなくなりガスは高温になり、円盤は回転軸方向に膨らむ。low/hard state のスペクトルは単一の power-law モデルに星間吸収を表す wabs モデルをかけたもので再現される。典型的なべきは 1.4-1.7 と high/soft state のべきに比べて小さい。

- very high state
  理論的に X 線光度がエディントン光度の ~ 10 %を越えると、放射圧がガス圧より大きくなり標準円盤の解が不安定になる。high/soft state・low/hard state にあるブラックホール連星の X 線スペクトルは前述の標準的な描像で合うものが多いが、RXTE 衛星などによって非常に光度が高いときにはこの描像で説明できない very high state という状態が見つかった。そのスペクトルは high/soft state に比べハードになっているが、power-law のべきは low/hard state のものより大きい。このため、steep power-law state とも呼ばれる。このスペクトルを標準降着円盤モデルでフィッティングすると、ブラックホール連星としてふさわしくないほど T_{in}(降着円盤の中心温度) が高く、r_{in}(降着円盤の中心半径) が小さくなる。very high state の詳細な解析によりこの状態は黒体放射された光子が高エネルギー電子によって逆コンプトン散乱されたことから生じると考えられる。この逆コンプトン散乱を表すモデルとして compbb モデルと thcomp モデルの 2 つがある。また、GRS1915+105 はこの状態に近いと考えられている。

2.3 ブラックホールからの X 線放射モデル

2.3.1 Disk black body

降着円盤からの放射モデルとして、前節で紹介した Multi-color Disk(MCD) モデルがある。MCD モデルは幾何学的に薄く光学的に厚い降着円盤が黒体放射するときのスペクトルを表したモデルであり、disk black body とも呼ばれる。パラメータは降着円盤の最も内側の温度 T_{in} と normalization の 2 つである。ビリアル定理より、降着するガスが円盤内縁に達するまでに解放するポテンシャルエネルギーの半分は、ガスの回転運動エネルギーになる。そして、もう半分が放射エネルギーに転換されディスクからの黒体放射となる (これが標準円盤モデルの概念)。また、降着円盤は半径によって温度が異なるので MCD モデルはいろんな温度での黒体放射を足しあわせたものになっている。ここで中心からの半径 r、厚さ dr の微小部分からの放射について考える。温度 T における単位時間、単位面積あたりの黒体放射のエネルギー放射は σT^4 になる (ステファンボルツマン定数 $\sigma = 5.67 \times\ 10^{-5} erg/cm^2/K^4/s$)。質量降着率を $\dot{M}$(半径によらず一定) として、微小半径部分 dr のポテンシャルエネルギーの半分がディスクからの上下から放射されるとすると、

$$2{\cdot}2\pi r dr{\cdot}\sigma T(r)^4 = \frac{1}{2} d(-\frac{G\dot{M}M_X}{r}) \tag{2.6}$$

という関係式になる。したがって温度 $T(r)$ は半径 r の関数で表すことができる。

$$T(r) = (\frac{3G\dot{M}M_X}{8\pi\sigma r^3})^{\frac{1}{4}} \tag{2.7}$$

また、降着円盤からの全光度は $T(r)$ を用いて

$$L_{disk} = 2\int_{r_{in}}^{r_{out}} 2\pi r \cdot \sigma T(r)^4 dr = 4\pi {r_{in}}^2 \cdot \sigma {T_{in}}^4 \qquad (r_{out} \to \infty) \tag{2.8}$$

となる。さらに、観測されるフラックスは傾斜角 i, 天体までの距離 D を用いて

$$f_{disk} = \frac{L_{disk}}{4\pi D^2}\cos i = 2\frac{\cos i}{D^2} \cdot 2\pi {r_{in}}^2 \cdot \sigma {T_{in}}^4 \tag{2.9}$$

となる。スペクトル観測より T_{in} L_{disk} が分かるので、(2.8) から r_{in} を求めることができる。また、理論的には Schwarzschild 半径の 3 倍まで安定した回転軌道が存在すると考えられており、r_{in} ~ $3r_s$ ~ $\frac{6GM}{c^2}$ とすることが多い。よって、この値を使うことによりブラックホールの質量も求めることができる。

2.3.2 熱的コンプトン散乱

光学的に厚い円盤から放射された光子の一部は、周りに存在する kT ~ $100keV$ の薄い超高温プラズマとコンプトン散乱を起こす。コンプトン散乱のモデルには、compbb モデルと thcomp モデルの 2 つがある。compbb モデルはコンプトン散乱される seed photon を単一の温度の黒体放射に従うとしたモデルである。thcomp モデルは compbb モデルとは異なり、seed photon は MCD 放射として計算する熱的なコンプトン散乱を表すモデルである。このモデルでは MCD 放射が逆コンプトン散乱を受けると仮定しているので、seed photon の温度は MCD モデルの T_{in} と同じに固定される。
散乱の要因となる超高温プラズマの起源を説明するモデルには、降着円盤の内側が放射圧によって光学的に薄く 10^9K になる「hot disk モデル」と、高温のコロナが光学的に厚い disk をはさみこむ構造をした「hot corona モデル」がある。

2.4 観測天体 (GRS 1915+105)

2.4.1 過去の観測結果

高エネルギー天体の 1 つであるブラックホール候補星 GRS 1915+105 は、1992 年に GRANAT 衛星によって発見された。D=12.5kpc に位置し、視線方向から i=70 ° の角度で jet を放出している。質量がクエーサーに比べ 7-8 桁小さいが、超光速 jet をもっておりクエーサーの縮小版という意味でマイクロクエーサーとよばれる。クエーサーよりはるかに近くにある GRS 1915+105 のようなマイクロクエーサーは、jet のメカニズムを詳しく探る格好の研究対象であり、多波長にわたってこれまで数多くの観測が行われている。GRS 1915+105 のスペクトルは MCD モデルと power-law というブラックホール候補星の標準モデルでは説明が出来ないことが分かっており、light curve も激しく変動する。GRS 1915+105 の様々な変動を Belloni et al 2000 では、ある規則に従い状態分けしており、詳しいことは次節で述べる。

2.4.2 Belloni et al 2000 による分類

Belloni et al 2000 では、1996-1997 の間に Rossi X-ray Timing Explorer(RXTE) で観測された GRS 1915+105 の 163 個のデータをそれぞれ light curve と color-color diagram(CD) をもとに 12 の class に分けている。ここでいう CD とは、エネルギー領域を A:2-5keV, B:5-13keV, C:13-60keV で分け、それぞれの count rate による 2 つの color:HR_1=B/A , HR_2=C/A を縦軸, 横軸に plot したものである。light curve は (A+B+C) のエネルギー領域で作成されたものである。light curve は複雑な変動をしているが、class ごとにある周期変動がみられる。図 2.2 の light curve は 1 秒ビンで plot されており、また color-color diagrams は light curve のそれぞれの点に対応するものが plot されている。12 の class はそれぞれ state A , state B , state C と定義された 3 状態の遷移で成り立っている。それぞれの state での典型的な CD は、図 2.1 のようになる。それぞれの state のスペクトルには明らかな特徴がみられる。state C は降着円盤からの放射が観測されないハードなスペクトルとなり、state A, B は降着円盤からの放射がはっきりしたソフトなスペクトルとなる。state A, B の状態はよく似ているが、カウントレートが state B の方が大きい。すなわち、降着率が state B の方が高い。
この分類は 1996-1997 年のデータによるもののため、今後はもっと新たな class が見つかると思われる。

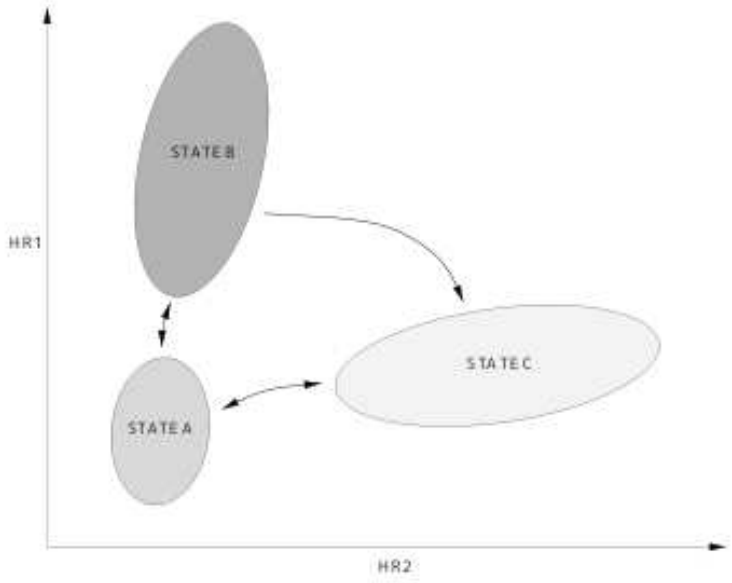


図 2.1: 典型的な state A/B/C を示した color-color diagrams

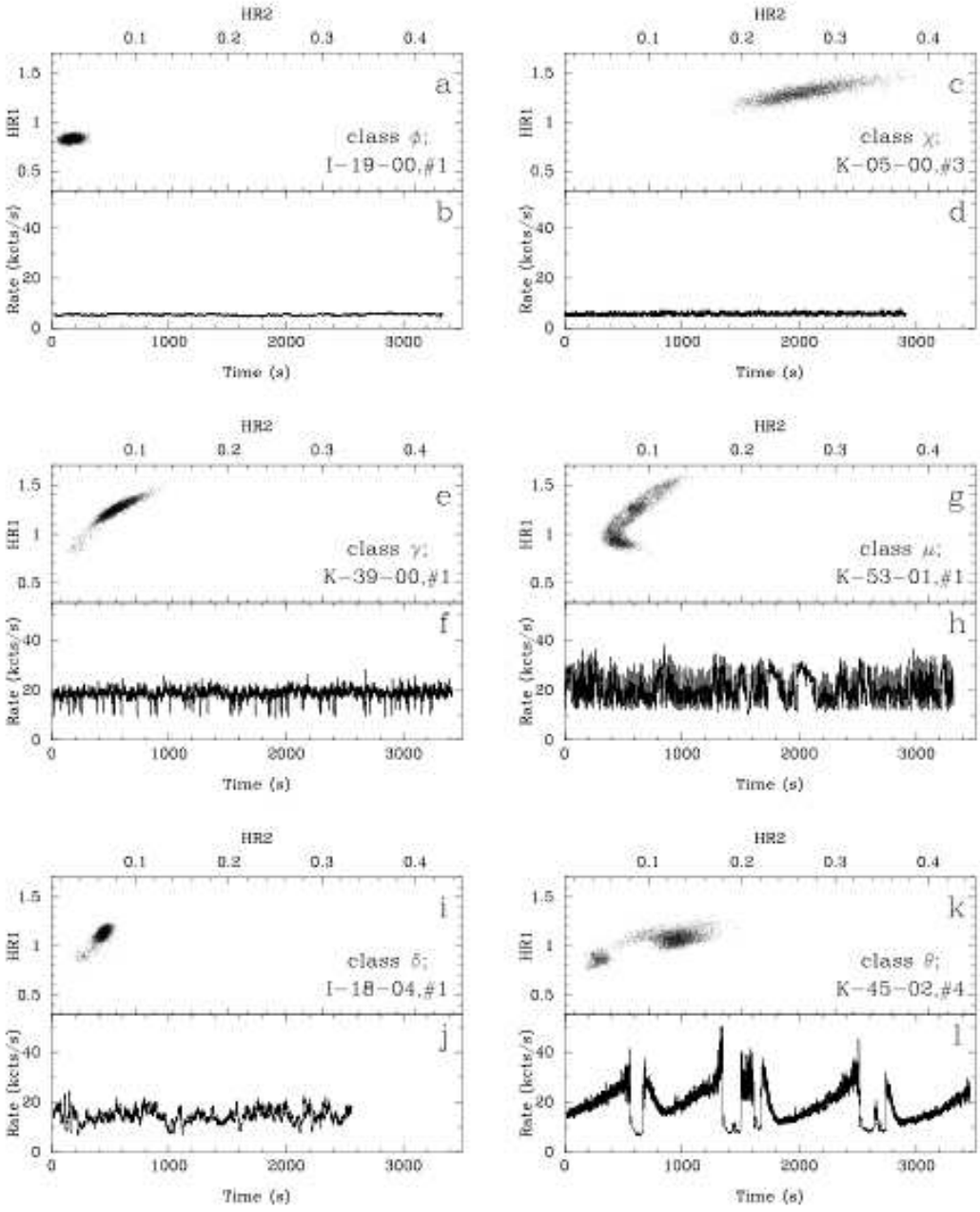
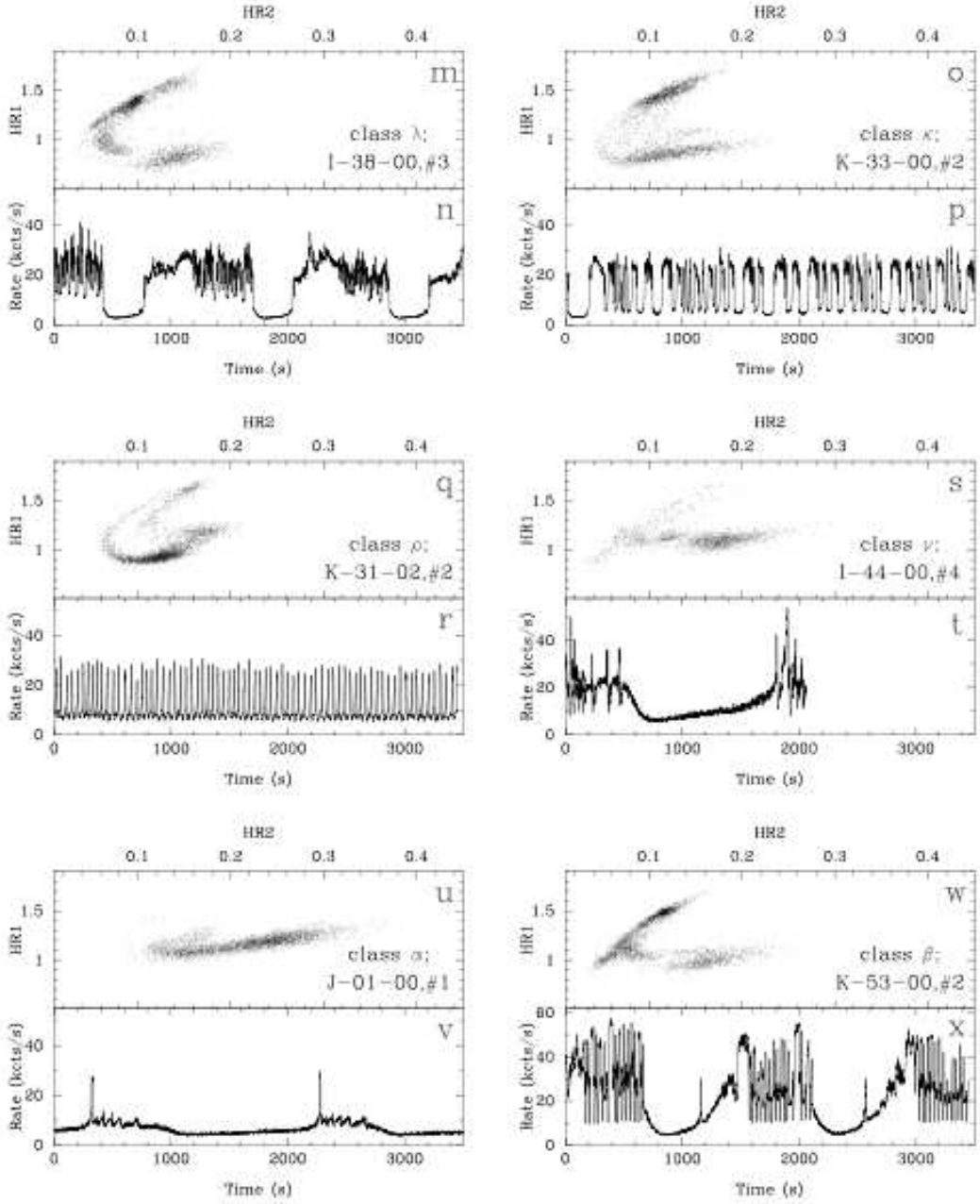


図 2.2: 12 の class の color-color diagrams と light curve の一例。(Belloni et al 2000. より)。


HR2
HR1
Rate (kcts/s)
Time (s)
m
class λ:
I-38-00,#3
n
o
class κ:
K-33-00,#2
p
q
class ρ:
K-31-02,#2
r
s
class ν:
I-44-00,#4
t
u
class σ:
J-01-00,#1
v
w
class β:
K-53-00,#2
x

第3章　観測装置「すざく」と解析方法

3.1　観測装置「すざく」

本研究では解析において「すざく」(Astro-E2) 衛星のデータを用いた。「すざく」は 2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた日本で 5 番目の X 線天文衛星である。高度約 570km を周回しており、1 日に地球を 15 周する。「すざく」には 5 つの軟 X 線検出器と 1 つの硬 X 線検出器が搭載されており、軟 X 線望遠鏡は 5 つの X 線反射鏡と 5 つの焦点面検出器 (4 つの XIS 検出器と 1 つの XRS 検出器) からなる。XRS 検出器の方は現在は観測不可能となっている。また、硬 X 線検出器である HXD(Hard X-ray Detector) は高いエネルギー (10 ー 700keV) の X 線を観測することができる。

図 3.1: 「すざく」の外観

3.1.1　X 線望遠鏡 (X-ray Telescope)

X 線は物質中で強く吸収され、屈折率が 1 よりわずかに小さいという特徴を持つ。そのために、X 線の光学系を作る際は屈折レンズが作れず全反射、ブラッグ反射のみが利用できる。反射鏡には密度の高い金が使われ、全反射は鏡面すれすれの角度の光線に対してのみ起こる。「すざく」の X 線望遠鏡 (XRT) は、口径 40cm、焦点距離 4.75m の XRT-I(焦点に XIS をおくもの) が 4 台と口径 40cm、焦点距離 4.5m の XRT-S(焦点に XRS をおくもの) が 1 台がある。反射鏡は、アルミ薄

板にレプリカ法で鏡面を形成したレプリカミラーを同心円状に並べており、小型超軽量だが大きな有効面積の X 線望遠鏡を実現している。

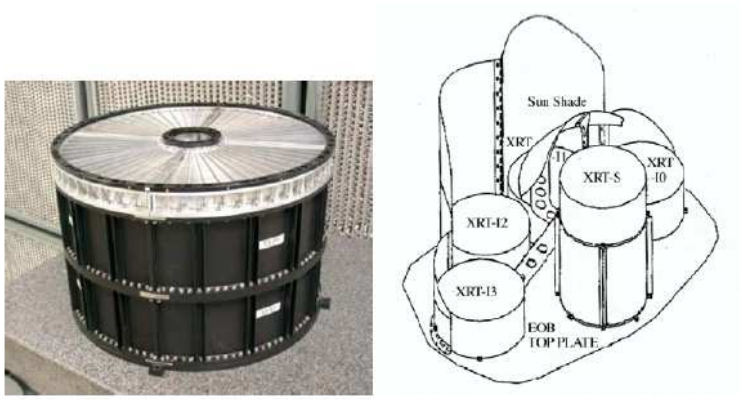


図 3.2: XRT の外観 (左) と配置図 (右)(The Suzaku Technical Description より)

3.1.2 XIS(X-ray Imaging Spectrometer)

XIS は X 線 CCD カメラで、0.2-12keV のエネルギー帯域をカバーしており、撮像とスペクトル測定が可能である。典型的なエネルギー分解能は 130eV である。XIS の 4 台のセンサーをそれぞれ XIS0,1,2,3 と呼ぶ。また、CCD には表面照射型 CCD(Frontside Illuminated;FI) と裏面照射型 CCD(Backside Illuminated;BI) の 2 種類があり、表面照射型では X 線を電極側から入射するため、低エネルギーの X 線は電極などに吸収されてしまうのに対して、裏面照射型では電極の反対側から入射するため電極への吸収がなく低エネルギーの X 線に対して高い検出効率を得ることができる。なお XIS0,2,3 が FI-CCD、XIS1 が BI-CCD である。

図 3.3: XIS の外観 (The Suzaku Technical Description より)

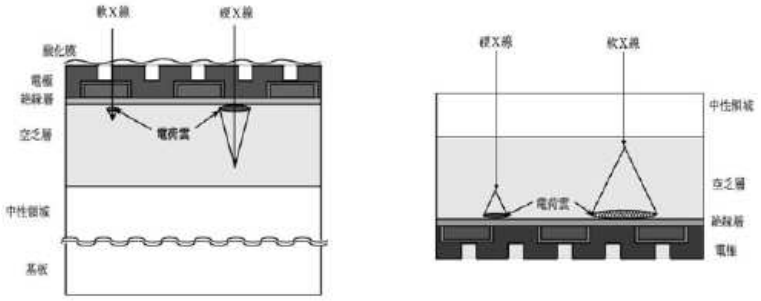


図 3.4: CCD の断面図 (東海林雅之 修士論文より) 表面照射型 CCD(左) と背面照射型 CCD(右) を模式的に示したもの

3.1.3 HXD(Hard X-ray Detector)

HXD は 10-700keV の広いエネルギー範囲の硬 X 線を高い感度で観測することを目的とした検出器である。基本となる井戸型フォスイッチカウンターは 16 本あり (Well ユニット)、その周りを BGO 結晶のアンチカウンター 20 本が取り囲んでいる。Well ユニットの主検出部は PIN 型半導体検出器と GSO シンチレータを上下に重ねた形で構成され、それぞれがカバーするエネルギー範囲は 10-60keV,40-600keV である。Anti 検出器は Well 検出器の周辺に並べることにより放射線に対するアクティブシールドの役割を果たし、トランジェント天体の全天モニター (WAM;Wideband All-sky Monitor) として利用される。

図 3.5: HXD の外観 (The Suzaku Technical Description より)

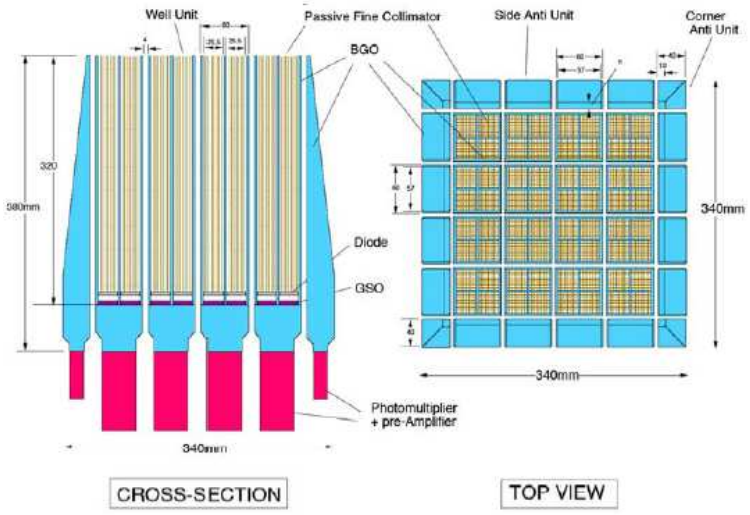


図 3.6: HXD の構造 (The Suzaku Technical Description より)

表 3.1: 「すざく」に搭載されている観測機器の概要

XRT	焦点距離	4.75m
	視野 (FWHM)	17'@1.5keV, 13'@8keV
	Plate scale	0.724arcmin/mm
	有効面積	$440cm^2$@1.5keV, $250cm^2$@8keV
	角分解能	2'(HPD)
XIS	視野	17'.8 × 17.'8
	エネルギー帯域	0.2-12keV
	有効画素数	1024 × 1024
	1 画素のサイズ	24μm × 24μm
	エネルギー分解能	~ 130eV@6keV
	有効面積 (XRT-I 込み)	340cm^2(FI), 390cm^2(BI)@1.5keV
		350cm^2(FI), 100cm^2(BI)@8keV
	時間分解能	8s(Normal mode), 7.8ms(P-Sum mode)
HXD	視野	34' × 34'($\leq$100keV), 4°.5 × 4°.5($\geq$100keV)
	エネルギー帯域	10-600keV(PIN 10-70keV, GSO 40-600keV)
	エネルギー分解能	PIN ~ 4keV(FWHM), GSO $7.6/\sqrt{E_{MeV}}$ % (FWHM)
	有効面積	~ 160cm^2@20keV, ~ 260cm^2@100keV
	時間分解能	61μs

3.2 解析方法

本研究で扱う GRS 1915+105 という天体は、非常に明るく常にエディントン光度近くの明るさで輝いている。こういった明るい天体の場合、XIS のデータを解析する際いくつか注意が必要である。

3.2.1 テレメトリ飽和について

XIS 検出器は 8 秒露光の後イベントをデータとして読み出すが、明るい天体の場合、取得したイベントを限られた数しか保存することできず CCD 上の一部しかデータが出力されないことがある。したがって、今回はそれぞれの 8 秒露光中毎秒毎のカウント R_t を 1 秒目のカウント R_1 と比較して $R_t > R_t - 2\sqrt{R_1}$ という条件を満たしている秒数のイベントまでを解析に使用した。また、CCD は 4 つの segment に分かれていて読み出しには segmentB → segmentC → segmentA → segmentD の順で行われる。2005 年データでは segmentA,segmentD は読み出されていなかったため実際の解析の際には segmentB,segmentC の部分のみ使用した。(図)

3.2.2 pile-up について

XIS 検出器の通常観測では、8 秒露光中に CCD 上でまばらに X 線が入射していて、1 ピクセルに 1 つの X 線が入射してエネルギーと位置の測定を行う。低エネルギー X 線が作る電子雲は 1pixel, 高エネルギー X 線は 2 × 2pixel, 荷電粒子は 2 × 2pixe 以上に広がる。しかし、明るい天体では 1 露光中に複数の X 線が同じピクセル付近に検出されてしまい、電子雲が重なって低エネルギー X 線が高エネルギー X 線、高エネルギー X 線が荷電粒子と認識されてしまうことがある。すざくチームが配布している cleaned event ファイルはスクリーニングが施されており、その中の cleansis という工程で 2 × 2pixsel 以上に広がったイベントは background として取り除かれてしまう。(図) そのため、明るい天体の解析では cleaned event ファイルではなく uf event ファイルというデータから cleansis の工程を行わずに独自のスクリーニングを行う必要がある。また、1 露光中に 1 つのピクセルに X 線が 2 つ以上検出されたときは pile-up と呼ばれ、測定されるエネルギーが検出されたエネルギーの和となり 1 個 1 個の X 線の情報を失い、複数の低エネルギー X 線が 1 つの高エネルギー X 線として認識されてしまう。そのため、pile-up イベントを解析しないようにすることが必要である。天体の像の中心ほど pile-up しやすいので、中心からどの程度イベントを切りぬけば pile-up の影響がなくなるかいろんな半径で試してみる。今回は 30pix,60pix,90pix,120pix の半径内を切りぬくことにしたが、その際衛星の姿勢揺らぎに注意しなければならない。すざく衛星は、太陽の熱によって衛星構体が歪み、天体のイメージが 90 分周期で、30 秒角の範囲で揺らいでしまう。そこで、衛星の姿勢揺らぎの補正をするために、200 秒では姿勢は一定と仮定して、200 秒毎のイメージを作り、それぞれのイメージで像の中心を決定し、切り出す領域の中心を決定した。

図 3.7 は、中心を切りぬいてから作成したスペクトルを同じスペクトル放射モデルでフィッティングしたものである。30pix ぐらい切りぬいたぐらいでは、まだ pile-up の影響が大きいのがよく分かる。本研究ではフィット結果より 90pix 切りぬいたものを採用することにした。

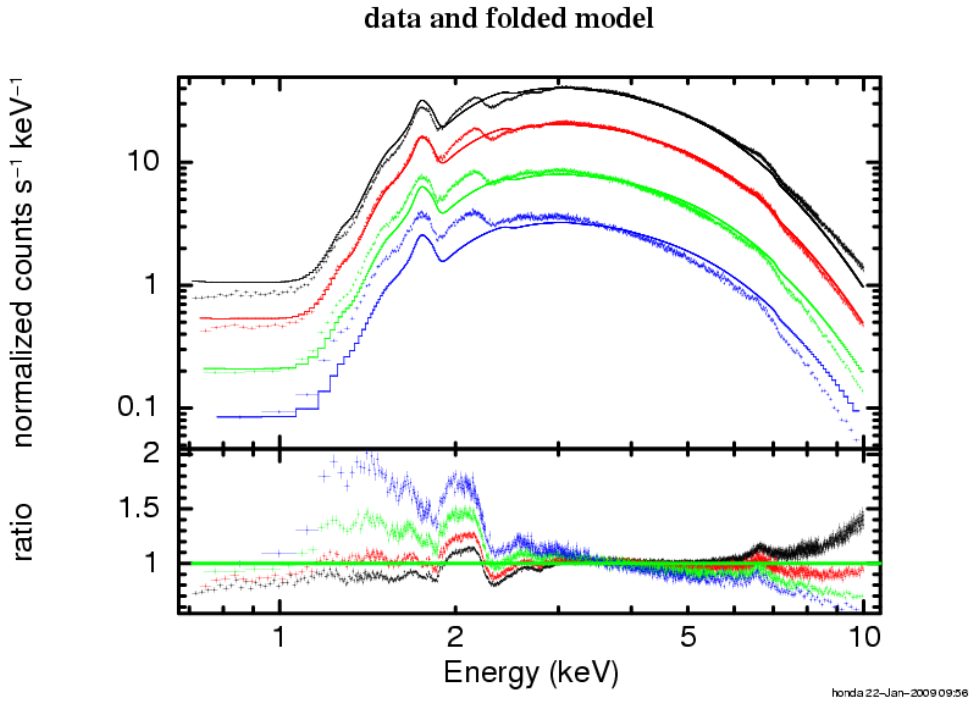


図 3.7: 中心から 30pix,60pix,90pix,120pix でイメージを切りぬいたスペクトル

第4章　解析結果

今回解析に使用した GRS 1915+105 のデータは、2005 年 10 月 16 日 ~ 10 月 18 日と 2007 年 5 月 7 日 ~ 5 月 9 日に「すざく」衛星で観測されたものである。解析に使用するイベントファイルは前章で述べた通り、uf ファイルからテレメトリー飽和と pile-up の補正を行い作成した。

4.1　全観測について

図 4.1 は、swift 衛星の Burst Aleart Telescope(BAT) と RXTE 衛星の All Sky Monitor(ASM) で観測された GRS 1915+105 の長期 light curve である。swift/BAT と RXTE/ASM は、それぞれ 15 ~ 150keV, 1.5 ~ 12keV のエネルギー領域をカバーしている。BAT, ASM データから得られた light curve は横軸が MJD(ModifiedJulian Date) になっている。MJD は、1858 年 11 月 17 日を 0 日とする通日である。MJD のような連続性のある絶対的な日付は便利でよく使用される。図 4.1 では本研究で解析を行った時間帯を青枠で示した。

4.2　2005 年観測について

4.2.1　時間変動

4.2.2　各状態でのスペクトル解析

4.3　2007 年観測について

4.3.1　2005 年観測との比較

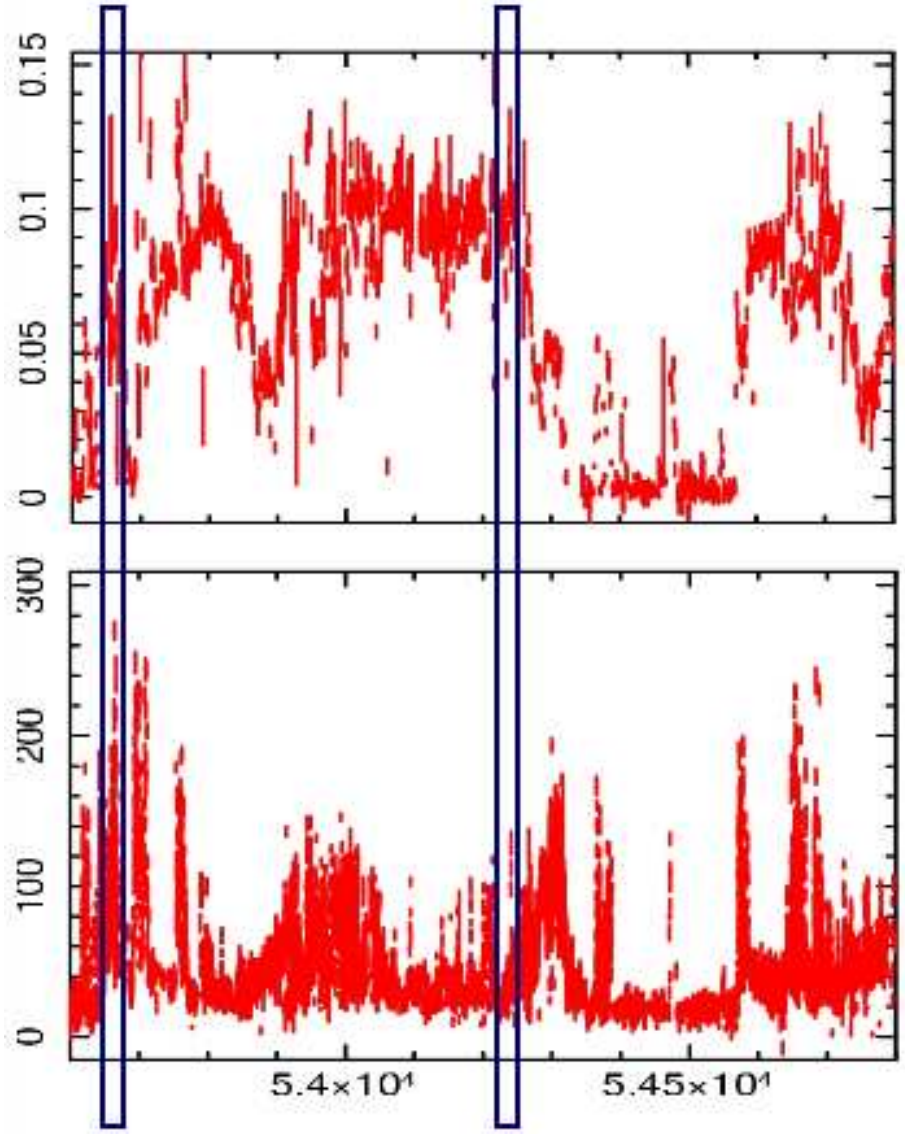


図 4.1: 上図:swift 衛星, 下図:RXTE 衛星による長期 light curve。青枠は、今回解析に使用した時間帯。(2005 年 10 月 16 日 ~ 10 月 18 日, 2007 年 5 月 7 日 ~ 5 月 9 日) 横軸は time(MJD), 縦軸は count rate。

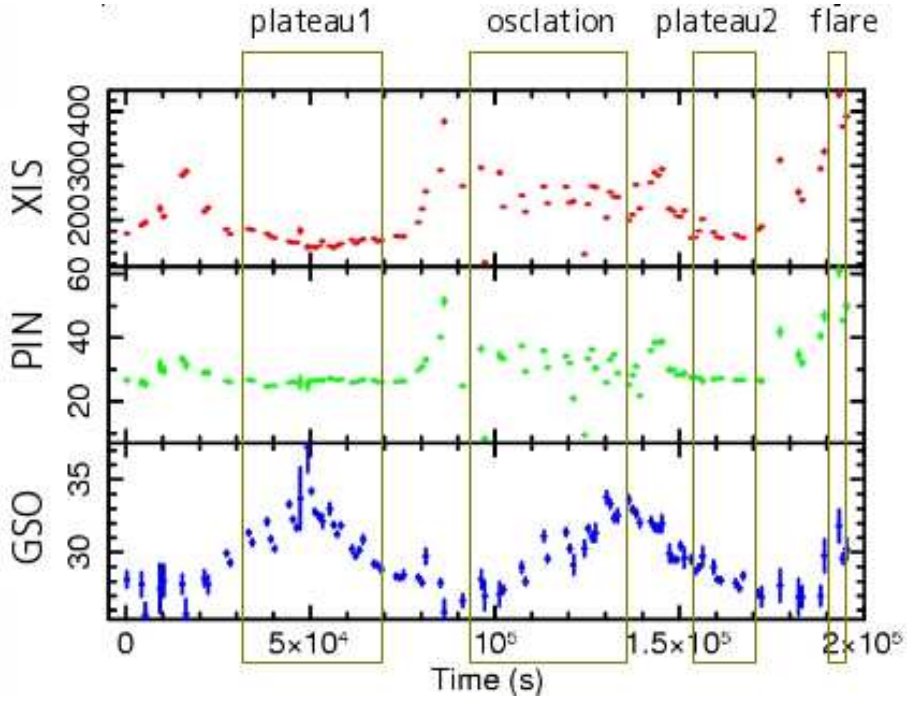

plateau1
osclation
plateau2
flare
XIS
PIN
GSO
60
200
300
400
20
40
30
35
0
5×10⁴
10⁵
1.5×10⁵
2×10⁵
Time (s)

図 4.2:

第5章　テストデュワー

5.1　デュワーの特徴

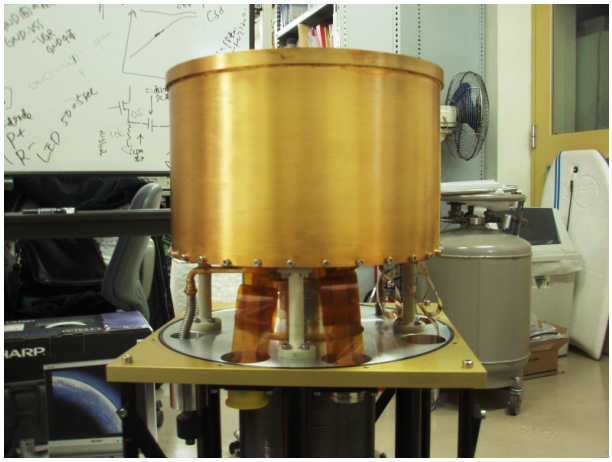


図 5.1: ラジエーションシールド

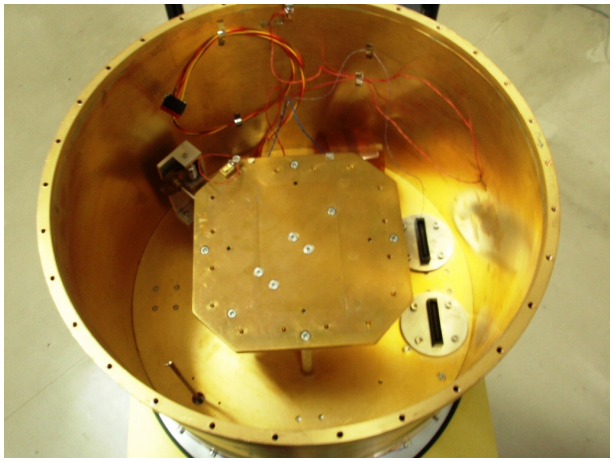


図 5.2: 温度コントロールステージ

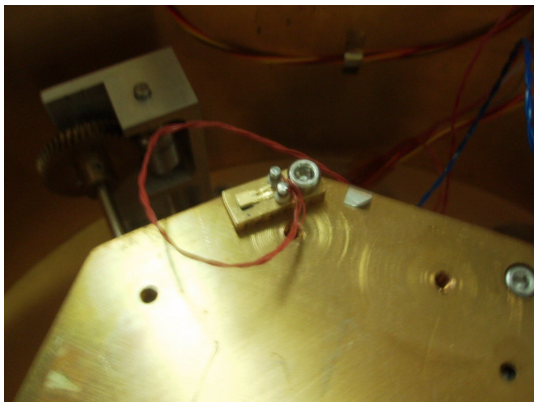


図 5.3: 温度コントロールステージ上の温度センサー

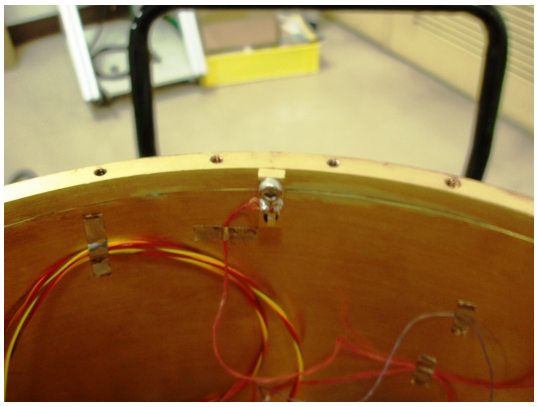


図 5.4: ラジエーションシールド側面の温度センサー

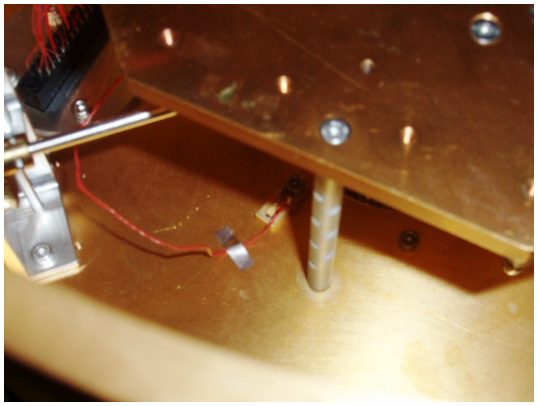


図 5.5: ラジエーションシールド底面部の温度センサー

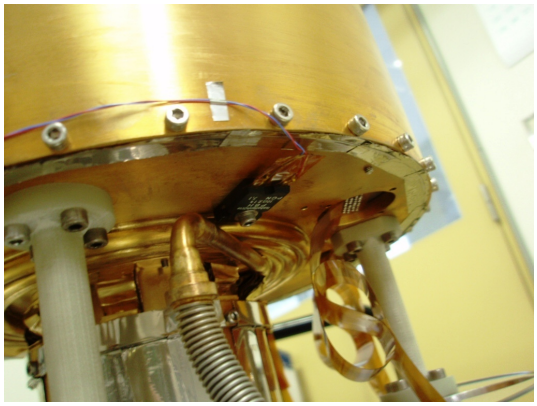


図 5.6: ラジエーションシールド外側底面部のヒーター

5.2 ハーメチックコネクタとの対応

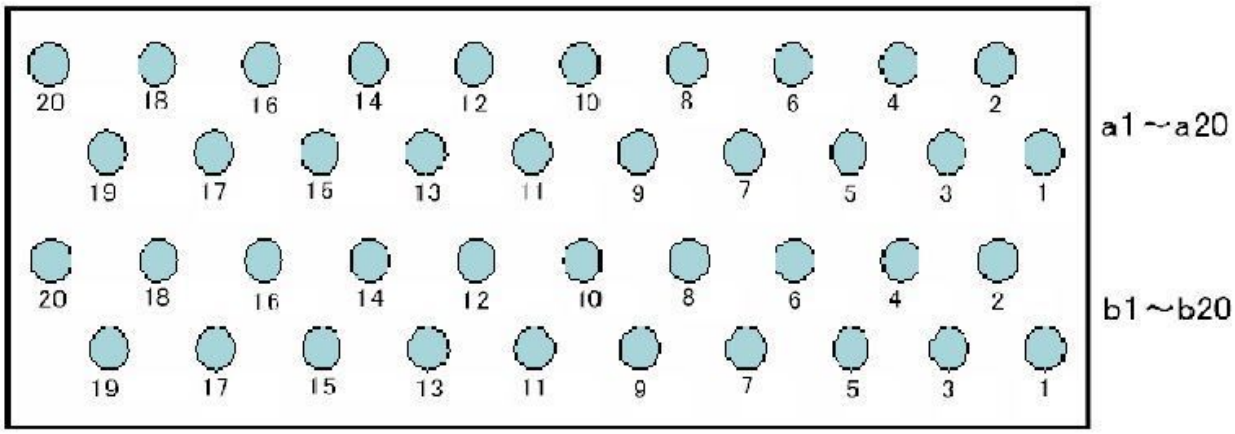


図 5.7: 40 ピンコネクタのピン配置

表 5.1: 40 ピンコネクタ、ハーメチックコネクタ対応番号

40 ピンコネクタ	ハーメチックコネクタ	40 ピンコネクタ	ハーメチックコネクタ
a1	D	b1	C
a2	E	b2	W
a3	X	b3	V
a4	F	b4	不使用
a5	Y	b5	B
a6	G	b6	不使用
a7	g	b7	f
a8	H	b8	不使用
a9	Z	b9	A
a10	J	b10	不使用
a11	a	b11	U
a12	K	b12	不使用
a13	h	b13	T
a14	L	b14	不使用
a15	b	b15	S
a16	M	b16	不使用
a17	c	b17	e
a18	N	b18	不使用
a19	j	b19	R
a20	P	b20	d

第6章　まとめと今後について

東広島天文台かなた望遠鏡の観測装置の 1 つである 3 素子から構成される可視赤外線同時撮像装置の立ち上げに向けて、私は今回その第一歩となる 3 素子のうちの 1 素子である近赤外検出器 VIRGO-2K の MUX の読み出し試験を行なった。まず、2 パターンクロック 15 種定電圧駆動という特徴を持つ VIRGO-2K の読み出しシステムを構築するため、プリアンプ・バイアスドライバ・クロックドライバを搭載したプリアンプボードを開発した。そして、その性能評価を行ない、MUX に接続しても問題ないことを確認した。また、Messia5 のホストコンピュータにて VIRGO-2K 用電圧ファイルおよびクロックパターンを作成した。そして、MUX を駆動させ、読み出し画像を無事取得することに成功した。これにより VIRGO-2K のサイエンスグレードを用いた試験を行なう土台は整った。さらに加えて、今後 VIRGO-2K の冷却試験に用いるデュワーの調査を行ない下準備も整えた。

今後は、まず第 5 章で紹介したデュワーの温度コントロールステージ部に VIRGO-2K を取り付けるための治具を作成した後、このデュワーを用いて VIRGO-2K の MUX の冷却試験を行ない、MUX が低温でも正常に機能するかを確認し、読み出しノイズなどの評価を行なう必要がある。その後は、現在広島大学が保有している VIRGO-2K は MUX とサイエンスグレードであるためエンジニアリンググレードでの性能評価は行わず、3 月納入予定のクライオスタットを用いて直接サイエンスグレードの真空冷却試験そして性能評価を行なう。さらに、今回身に着けた近赤外線検出器および読み出しシステムの知識を活かして、現在浜松ホトニクスで開発中の近赤外線検出器の立ち上げに関わる。加えて、可視 CCD にも着手する。そして、2007 年度中に可視赤外線同時撮像装置のファーストライトを目指す。

付 録A　MOSFET

少量の電子の信号を確実に感知するには感度のよい回路が必要となる。そこで検出素子出力のアンプとして用いられるトランジスタに電界効果トランジスタ (field effect transistor:FET) というものがある。FET は、gate によって定まる電場により channel を通じて source から drain へ流れる電流を制御できるもので、大きく分けて 2 つの種類が存在する。1 つが接合型電界効果トランジスタ (junction FET:JFET) で、もう 1 つが金属酸化物半導体トランジスタ (metal-oxide-semiconductor FET:MOSFET) である。ここでは、MOSFET について説明する。図 A.1 にエンハンスメント型 n-MOSFET を示す。

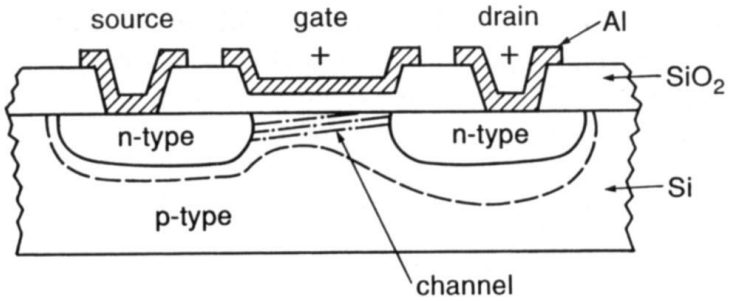


図 A.1: エンハンスメント型 n-MOSFET

このトランジスタのダイオードは図のように n-p-n という形状のため source-drain 間の n-type 物質は連続していない。そのため普通デバイスはピンチオフ (channel なし) の状態にある。ここで、gate に+の電圧を印加した場合、絶縁体 SiO_2 の下側に電荷キャリアを引きつける。この電圧が強ければ、channel を形作り電流が流れることになる。この channel のサイズと電流量は、gate に印加する電圧によって制御することができる。

ここまで n-MOSFET について説明したが、p 型の場合は n 型と p 型ドープ物質の位置と役割が逆になるだけである。また、エンハンスメント型というのは gate 電圧を印加することにより channel が形成、電流が流れるものをいう。逆に、channel を予め形成しておき、gate 電圧を印加することで空乏層を広げ channel を狭くし電流を減少させる方向に制御できるデプレッション型というものもある。

付 録B　検出器周辺部図面

中屋秀彦氏提供のプリアンプ、バイアスドライバ、クロックドライバの回路図と MFront2 の ADC ボードおよびバイアスボードのピン番号の図を示す。

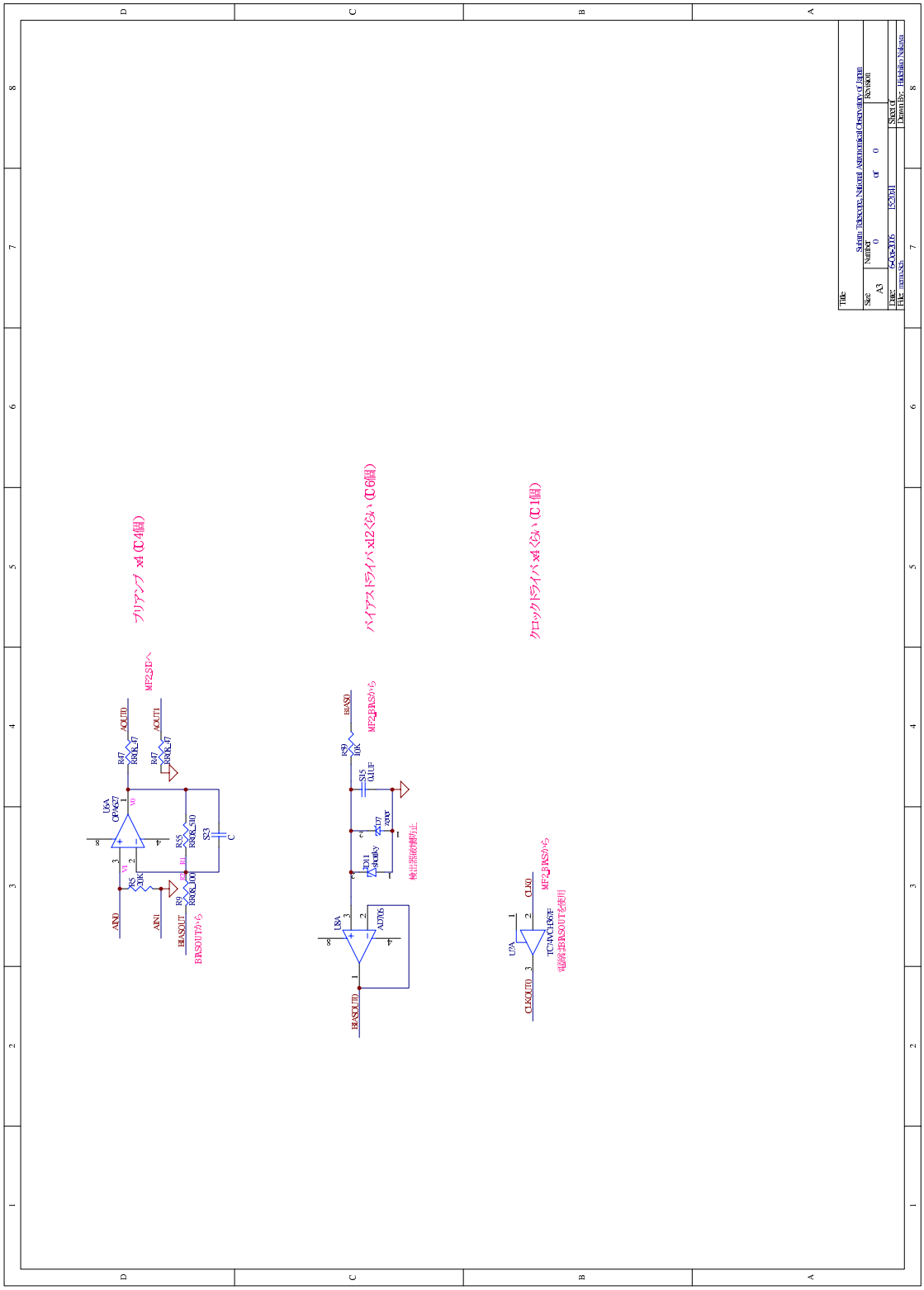


図 B.1: プリアンプ・ドライバ回路図

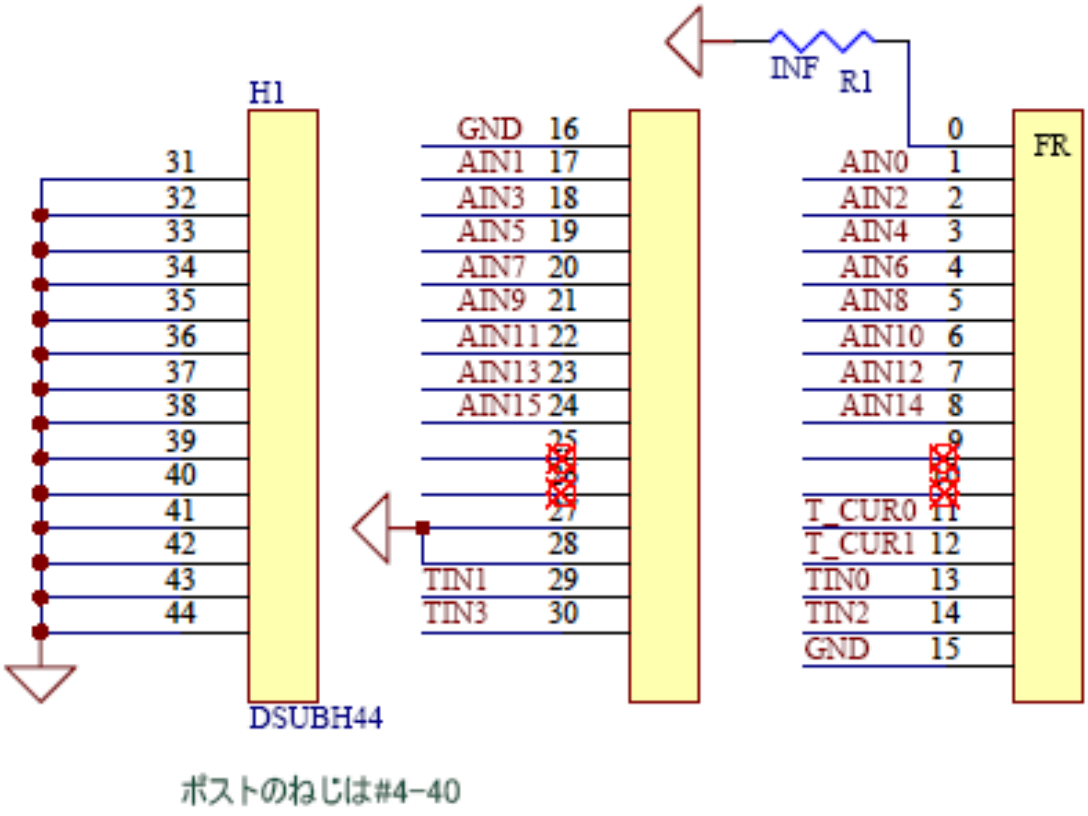


図 B.2: ADC ボードピン番号

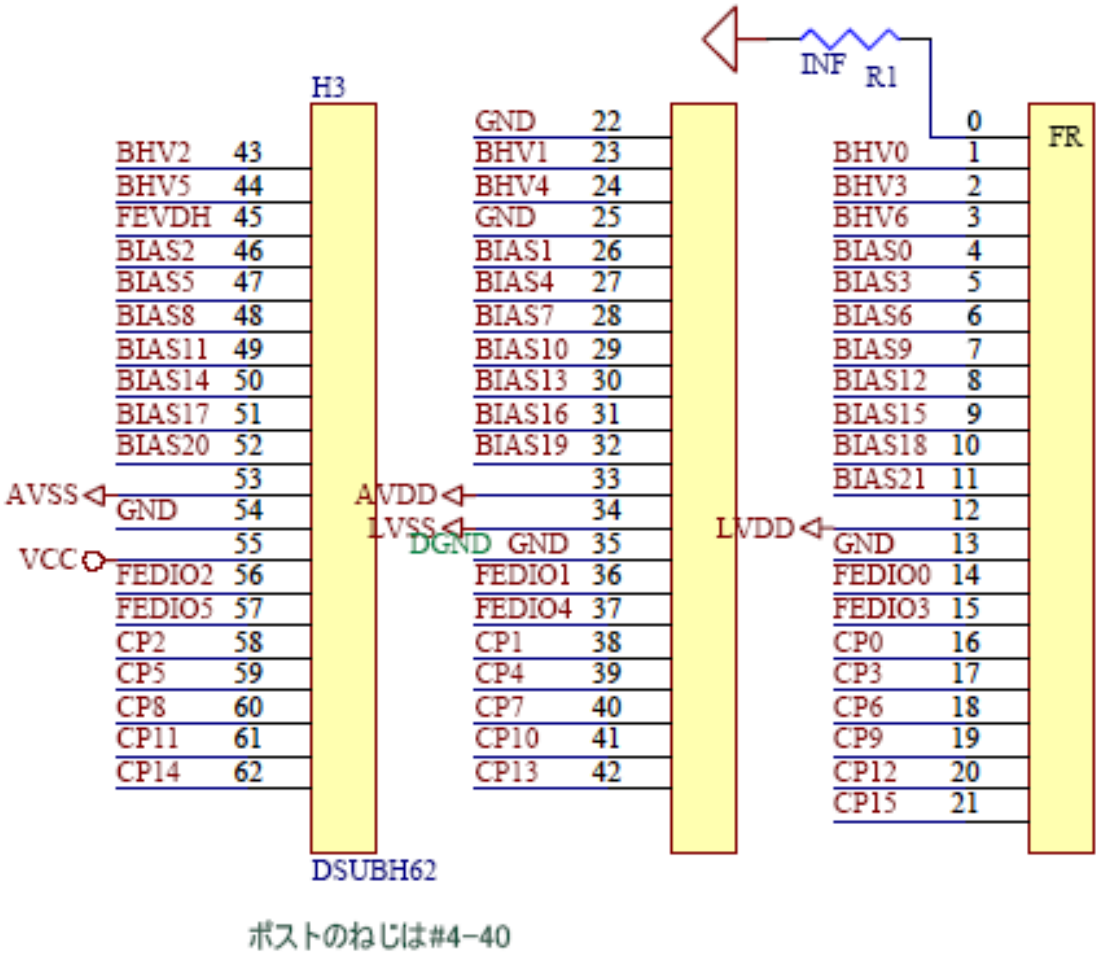


図 B.3: バイアスボードピン番号

付 録C　VIRGO-2K用クロックパターン

C.1　cpg.ascii

cpg.ascii はクロックパターンの最小単位を記述するためのファイルである。ファイル内の番号 0、3、6、9 は VIRGO-2K 用のクロックパターンで、15 ~ 19 が ADC 用のクロックパターンである。19 番の CONV のクロックが立ち上がり時が AD コンバートのタイミングなので、VIRGO-2K 用のクロックはそれに合わせて 2 ピクセル分のクロックパターンを以下のように作成した。

C.1.1　リセット用クロック

```
#####################################################################

set_clock_tick  1  # numebr of 80nsec clock ticks in one time bin
operation_type 11  # no-read reset (FrameStart)

#       S  p  R  R  T  C  C  C  C  S
#       t  m  e  e  R  D  D  D  O  L
#       a  c  s  s  A  S  S  S  N  E
#       r     e  e  N  -  +  O  V  E
#       t     t  t                 P
#             M
#             o
#             d
#             e
#
start   0  3  6  9  15 16 17 18 19 29
t  25   ]  |  |   ] |  |  |  |  |   ]
t   2   ]  |  |   ] |  |  |   ] |   ]
t  25   ]  |  |   ] |  |   ]  ] |   ]
t   2   ]  |  |   ] |  |  |   ] |   ]
t   1   ]  |  |   ] |  |  |   ] |   ]
t   1   ]  |  |   ] |  |  |  |  |   ]
t  25   ]   ] |   ] |  |  |  |  |   ]
t   2   ]   ] |   ] |  |  |   ] |   ]
```

```
t  25   ]   ] |   ] |  |   ]  ] |   ]
t   2   ]   ] |   ] |  |  |   ] |   ]
t   1   ]   ] |   ] |  |  |   ] |   ]
t   1   ]   ] |   ] |  |  |  |  |   ]

end

#####################################################################

set_clock_tick  1  # numebr of 80nsec clock ticks in one time bin
operation_type 13  # no-read reset

#      S  p  R  R  T  C  C  C  C  S
#      t  m  e  e  R  D  D  D  O  L
#      a  c  s  s  A  S  S  S  N  E
#      r     e  e  N  -  +  0  V  E
#      t     t  t                P
#            M
#            o
#            d
#            e
#
start  0  3  6  9  15 16 17 18 19 29
t  25  |  |  |   ] |  |  |  |  |   ]
t   2  |  |  |   ] |  |  |   ] |   ]
t  25  |  |  |   ] |  |   ]  ] |   ]
t   2  |  |  |   ] |  |  |   ] |   ]
t   1  |  |  |   ] |  |  |   ] |   ]
t   1  |  |  |   ] |  |  |  |  |   ]
t  25  |   ] |   ] |  |  |  |  |   ]
t   2  |   ] |   ] |  |  |   ] |   ]
t  25  |   ] |   ] |  |  |   ]  ] |   ]
t   2  |   ] |   ] |  |  |   ] |   ]
t   1  |   ] |   ] |  |  |   ] |   ]
t   1  |   ] |   ] |  |  |  |  |   ]

end

#####################################################################
```

C.1.2　読み出し用クロック

```
#####################################################################
set_clock_tick  1  # numebr of 80nsec clock ticks in one time bin
operation_type 21  # no-reset read (FrameStart)

#      S  p  R  R  T  C  C  C  C  S
#      t  m  e  e  R  D  D  D  O  L
#      a  c  s  s  A  S  S  S  N  E
#      r     e  e  N  -  +  0  V  E
#      t     t  t                 P
#            M
#            o
#            d
#            e
#
start  0  3  6  9  15 16 17 18 19 29
t  25   ] |  |  |  |  |  |  |  |   ]
t   2   ] |  |  |  |  |  |   ] |   ]
t  25   ] |  |  |  |  |   ]  ] |   ]
t   2   ] |  |  |  |  |  |   ] |   ]
t   1   ] |  |  |  |  |  |   ]  ]  ]
t   1   ] |  |  |  |  |  |  |  |   ]
t  25   ]  ] |  |  |  |  |  |  |   ]
t   2   ]  ] |  |  |  |  |   ] |   ]
t  25   ]  ] |  |  |  |   ]  ] |   ]
t   2   ]  ] |  |  |  |  |   ] |   ]
t   1   ]  ] |  |  |  |  |   ]  ]  ]
t   1   ]  ] |  |  |  |  |  |  |   ]

end

#####################################################################

set_clock_tick  1  # numebr of 80nsec clock ticks in one time bin
operation_type 23  # no-reset read

#      S  p  R  R  T  C  C  C  C  S
#      t  m  e  e  R  D  D  D  O  L
#      a  c  s  s  A  S  S  S  N  E
#      r     e  e  N  -  +  0  V  E
```

```
#      t     t  t                P
#            M
#            o
#            d
#            e
#
start  0  3  6  9  15 16 17 18 19 29
t  25  |  |  |  |  |  |  |  |  |   ]
t   2  |  |  |  |  |  |  |   ] |   ]
t  25  |  |  |  |  |  |   ]  ] |   ]
t   2  |  |  |  |  |  |  |   ] |   ]
t   1  |  |  |  |  |  |  |   ]  ]  ]
t   1  |  |  |  |  |  |  |  |  |   ]
t  25  |   ] |  |  |  |  |  |  |   ]
t   2  |   ] |  |  |  |  |  |   ] |   ]
t  25  |   ] |  |  |  |   ]  ] |   ]
t   2  |   ] |  |  |  |  |   ] |   ]
t   1  |   ] |  |  |  |  |   ]  ]  ]
t   1  |   ] |  |  |  |  |  |  |   ]

end

#####################################################################
```

C.2 spv.ascii

spv.ascii は cpg.ascii で作成したクロックパターンの最小単位を組み合わせて実際に出力するクロックを記述するためのファイルである。cpg.ascii で作成した 2 ピクセル分のクロックをループさせることで 2k×2k 分のクロックが出力できる。VIRGO operation は実際の MUX 駆動試験で用いたクロックパターンで、VIRGO test はピンチェックで用いたクロックパターンである。

```
# ------------------------------------------------------------ #
#                  VIRGO operation                             #
# ------------------------------------------------------------ #

begin virgo_reset

       ccd_operation 0 11   1
       ccd_operation 0 13  258
       loop1_start 2049
            ccd_operation 0 13 259
       loop1_continue

end

begin virgo_read

      ccd_operation 0 21   1
      ccd_operation 0 23 258
      loop2_start 2049
           ccd_operation 0 23 259
      loop2_continue
      ccd_operation 0 23 8192
end

# ------------------------------------------------------------ #
#                  VIRGO test                                  #
# ------------------------------------------------------------ #

begin virgo_reset_loop

   loop3_start 999999
       ccd_operation 0 11 1
       ccd_operation 0 13 5
       loop4_start 2
```

```
            ccd_operation 0 13 6
        loop4_continue
     loop3_continue

end

begin virgo_read_loop

   loop5_start 999999
        ccd_operation 0 21 1
        ccd_operation 0 23 5
        loop6_start 2
            ccd_operation 0 23 6
        loop6_continue
   loop5_continue

end
```

謝辞

本研究を遂行するにあたり、様々な方の御助力を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

まず、まだ学部生であるこの私に近赤外線検出器の立ち上げという貴重な研究課題を与えて下さったばかりでなく、半田付けをはじめ多岐にわたる御指導を頂きました広島大学宇宙科学センターの山下卓也教授に深甚の謝意を表します。

国立天文台ハワイ観測所の中屋秀彦氏には回路の細部にわたる御指導から Messia5+MFront2 の操作、シェルの作成、さらにはふとした疑問にも明瞭かつ簡潔にお答え頂きました。国立天文台の鎌田有紀子さんにはお茶の振る舞いから私の体のお気遣いまでして下さいました。御二方に感謝致します。また、計 2 週間半にわたる期間私に研究の場を提供して下さいました国立天文台先端技術センターの方々に厚く御礼申し上げます。特に、先端技術センター事務の吉田さん、村上さんにはいろいろと御迷惑をお掛け致しましたことをこの場を借りてお詫び申し上げます。

また、広島大学高エネルギー宇宙研究室および宇宙科学センターの皆様から様々なサポートを頂きました。まず、高エネ研の大杉先生には研究課題において私に選択の余地を与えて下さいました。また回路に関してアドバイスを頂きました。深澤先生には 1 年間を通してセミナーから卒論執筆まで大変お世話になりました。水野氏においては共に小部屋で過ごしているだけで楽しめました。宇宙科学センターの川端先生には東広島天文台での作業において様々な助言を頂きました。植村氏にはシリアル通信でアドバイスを頂きました。スタッフの皆様ありがとうございました。また、同じ可視光メンバーである D1 の永江さん、新井さん、M2 の千代延さん、M1 の保田さんには様々な面でお世話になりました。特に、永江さんには装置は違えど共に開発を進めていることもありいろいろとお世話になりました。また、事務手続きに際して石井さん、上原さんには大変お世話になりました。

研究生活においても先輩方のおかげで楽しく過ごすことができました。ありがとうございました。共に過ごした 4 年生のみんなもありがとう。おかげで楽しく過ごすことができました。

また、家族のみんなには心の底から感謝しております。家族という心の支えがあったからこそこの 1 年頑張り通すことができました。また同時にいろいろと考えさせられる 1 年でもありました。ぜひぜひ健康にお過ごし下さい。

最後になりましたが、今回次頁に挙げる先人方の論文を参考にさせて頂きました。非力な私がここまで来れたのも、この方々のおかげと言っても過言ではありません。この装置の開発は始まったばかりでまだまだ勉強不足の面も多々ございますがひとまずの区切りとして、このような方々を含め私に関わったすべての方に感謝の意を表してこの卒業論文を締めくくりたいと思います。皆様本当にありがとうございました。

参考文献

[1] Raytheon, VIRGO-2K 2048 × 2048 SWIR HgCdTe IRFPA Readout Model:SB-301 User's Guide and Operating Manual

[2] 本原 顕太郎 「すばる OHS 用冷却赤外分光カメラ CISCO の開発」京都大学　修士論文　1997