

Cygnus X-1 の硬 X 線領域における短時間変動について*

内田 正美**・中川 道夫***・山内 誠***
桜井 敬久†

(1987年5月7日受理)

Short Time Variation of Hard X-ray from Cygnus X-1

By

Masami UCHIDA, Michio NAKAGAWA, Makoto YAMAUCHI
and
Hirohisa SAKURAI

Abstract: We analyzed the short time variability at hard X-ray of Cygnus X-1 by several methods.

As the results of analysis, unstable periodic 18.9 S variation was obtained by Autocorrelation function and Power Spectrum Density function.

This characteristic time scale suggest the period that the local regions, including the hard X-ray emitting spots, rotate around the Black Hole.

概 要

我々は硬 X 線領域に於ける Cyg X-1 の短時間変動をいくつかの方法で解析した。その結果、自己相関関数とパワー・スペクトル密度関数から、定常的ではないが 18.9 秒の周期的な変動が得られた。

この変動時間は、硬 X 線を発生する所を含む局所的な領域が、ブラック・ホール周囲を回転する周期を示唆している。

* 宇宙研特別事業費による論文

** 大阪信愛女学院

*** 大阪市立大学理学部

† 山形大学理学部

1. はじめに

Cyg X-1の短時間変動は、ミリ秒にまでおよぶと考えられ様々な様相を呈している。しかし秒程度以下の変動は本質的に統計量が少なく、硬 X 線領域に於いてはその研究に困難を伴っているため、軟 X 線領域に於ける研究が多い。

従来より、観測データの自己相関関数が、ラグ時間の小さい所で指数関数に近似できることから、一定の時定数と波高をもつ指数関数型の shot noise モデルを用いたシミュレーションを行ない、0.5~1.0 秒の特徴的時間が得られている[1]~[5]。この特徴的時間は、変動係数からも求められており[4][6]、Cyg X-1の短時間変動の特徴の一つである。しかし、Cyg X-1の変動は複雑で、単一の指数関数型 shot noise モデルで表わすことは困難であり、また shot の形が、時間に対してむしろ対称的であるなどの理由により、指数関数型の shot は疑問視されるようになった[7][8]。そこで Priedhorsky 等は、同様な自己相関関数を持ち、時間に対して対称なモデルとして、幅が指数分布している矩形 shot を呈示している[8]。これら shot noise モデルはいずれも accretion disk 中に存在する hot spot を想定している。一方土井は、~1 秒程度の短時間変動が、accretion disk 中の温度のゆらぎを原因とするものであるとし、温度のゆらぎの自己相関関数が観測結果の自己相関関数によく一致していることを示している。[6]

秒以上の変動は軟 X 線及び硬 X 線領域ともに研究されており、1~10 秒のフレアー[11]、17~20 秒の変動[12]~[16]が報告されている。特に 17~20 秒の変動は、今までのところ、すべて硬 X 線領域の観測により報告されている。

Nolan 等は、10~140 keV のエネルギー帯で、フーリエ解析によるパワー・スペクトル密度関数(PSD)が、20 秒附近に折れ曲がりを持ち、そこを境として変動の様子が変化していることを見い出している[16]。この 20 秒程度の変動は定常的ではないが、周期性を持つことが報告されている。

藤井と西村は、24~50 keV のエネルギー帯のデータをもとにして、1 分毎の自己相関関数を求め、約 17 秒の周期性が、しばしば表われることを示している[15]。同じ周期で、しばらく持続する変動が、Frontera 等により、30~200 keV のエネルギー帯でフーリエ解析を用いて見い出されている。彼らは、波高がしだいに減少する指数関数型パルス列によるシミュレーションを行ない、観測結果によく一致する PSD を得ている[13][14]。これらの解析には、自己相関関数又は PSD が用いられているが、中川等は PSD による解析の結果にもとづいて、重ね合わせ法により 19.2 秒の変動を抽出し、変動の様子をより明らかにした[12]。これらの結果は、17~20 秒の変動も他の特徴的な変動と同じく、様々な様相を呈しているがある周期性を持つことを示している。

我々は、1982 年 9 月に行なった気球観測のデータをいくつかの方法で解析し、19 秒附近の周期性をもつ特徴的時間変動を得た。その結果についてここに報告する。

2. 観 測

観測装置の詳細はすでに発表しているため[23]、要点のみを記す。X 線検出器には、NaI

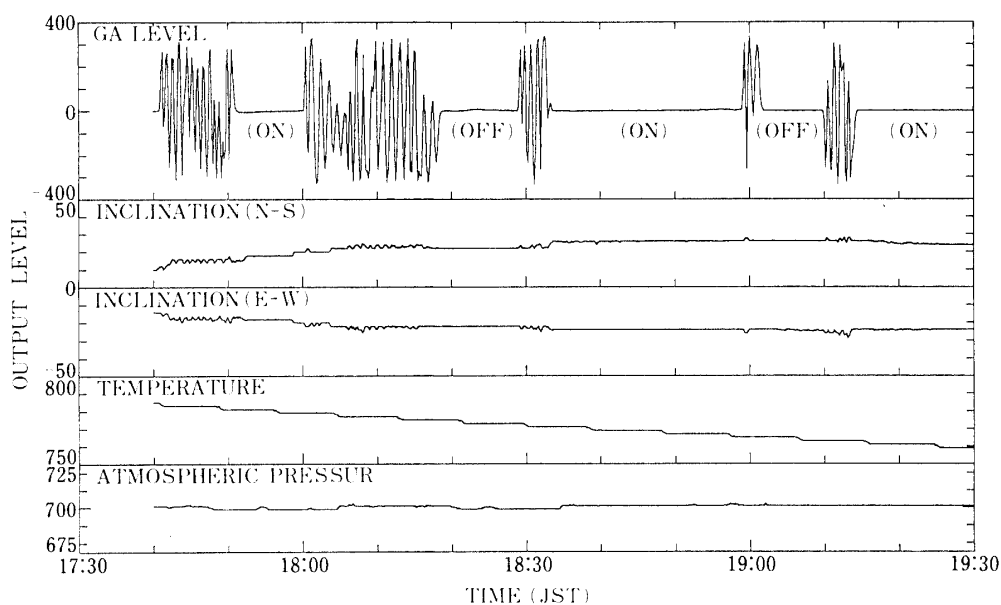
(TI)シンチレータを用い、視野は、東西方向 $20^\circ \times$ 南北方向 4° (FWHM)、最大有効面積 880cm^2 であった。観測したエネルギー帯は $25\sim 85\text{keV}$ で、この間を6エネルギー帯に分割し、カウンター別、エネルギー帯別に40ミリ秒間積分したカウント数が、GAセンサー、東西、南北の各方向の傾斜角、温度、気圧の各HKデータと共にPCM方式で送られて来た。

気球は1982年9月29日、三陸大気球観測所より放球され、18時45分の南中前後3時間にわたってCyg X-1の観測が行なわれた。

南中前後2時間の、10秒毎に平均したHKデータの出力レベルを第1図に示す。図中ONは検出器がCyg X-1を見ている状態(on-mode)で、OFFはCyg X-1に対して 180° 反対側を向いている状態(off-mode)である。off-modeでは視野内に特定のX線源は含まれていない。

第1図で、GAレベルがsin波形で変化している所は、on-modeとoff-mode間を変化させるために、コマンドによりゴンドラが天頂方向を軸として回転している時間である。両modeのGAレベルは一定値を保っており、方向規制が働いて、ゴンドラが予め設定された向きを保っていることを示している。また、傾斜計の出力レベルも両modeとも、バラストを放出したときを除き安定した値を保っている。さらに、温度センサーによると日沈前後より、気温はしだいに下がっている。気温の低下に伴ない、気球の高度が下がるため日沈補償を行なう必要がある。気圧計のデータによると、気圧はほぼ一定の値に保たれており、日沈補償が有効になされていたことを示している。

これらのデータにより、両modeとも、ゴンドラの高度及び姿勢は安定していたことがいえる。



第1図 HK データ

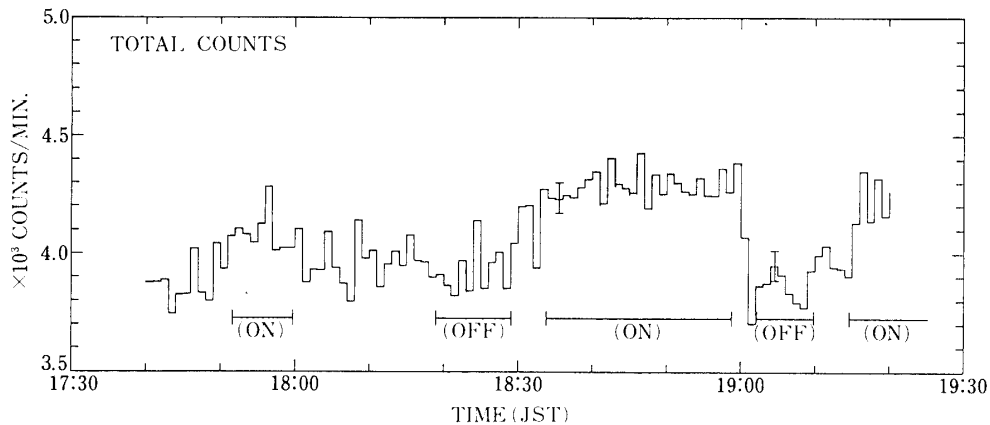
3. データの解析

南中前後1時間半の、1分毎のカウント数の推移を第2図に示す。on-modeでは、明らかな増加が見られCyg X-1を観測していることを示している。

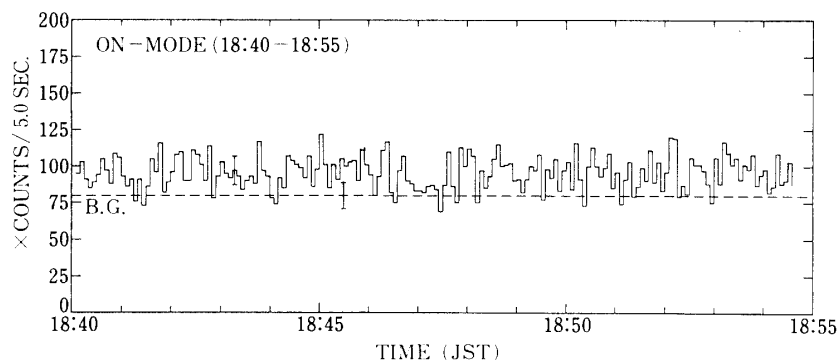
エネルギー帯47.5~62.5 keVに於ける、南中前後15分間のtime profileを第3図に示す。bin幅は5.0秒である。図中、点線は南中前後のoff-modeのデータから求めた、バックグラウンドレベルを示している。これらのデータを用いて、以下に述べるような時間変動の解析を行なった。

(1) 変動係数

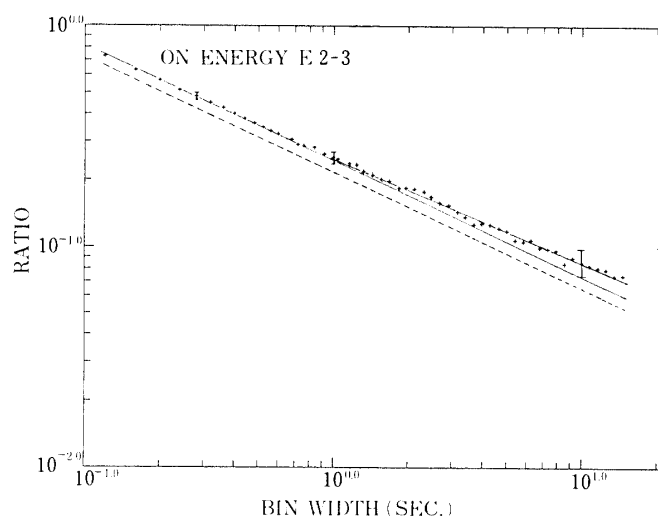
Cyg X-1の時間変動がランダムであり、統計的なゆらぎのみであるならば、ある時間内に含まれるカウント数の分布は、poisson分布をしている。そこで、データを各ビン幅に分割したときのカウント数の分布の、poisson分布への適合度を見るために変動係数[6]を求めた。変動係数 η は、分散の平方根と平均との比で定義されている。いま、bin幅 t 秒で分割したときの各binにおけるカウント数 $n_k(t)$ の平均を $\bar{n}(t)$ 、分散を $V(t)$ とすると



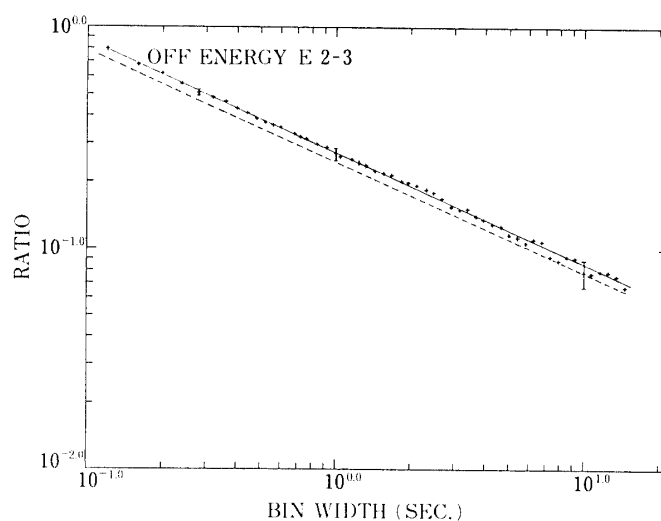
第2図 南中前後1時間半のタイム プロファイル



第3図 南中前後15分間のタイム プロファイル



(a) on mode



(b) off mode

第4図 変動率

$$\eta(t) = \frac{\sqrt{V(t)}}{\bar{n}(t)}$$

である。

$n_k(t)$ が poisson 分布をするならば、 $V(t) = \bar{n}(t)$ であるので

$$\eta_p(t) = \bar{n}(t)^{-\frac{1}{2}}$$

となる。両辺の対数を取ると

$$\log \eta_p(t) = -\frac{1}{2} \log \bar{n}(t)$$

であり、傾き $-1/2$ の直線となる。したがって、データより $\eta(t)$ を求め $\eta_p(t)$ と比較することにより、Cyg X-1 の本質的な変動の特徴的時間を得ることができる。第4図は0.12~14秒の bin 幅に対して求めた、(a) on-mode, (b) off-mode の変動係数 η_{on} , η_{off} である。誤差棒は $\pm 1\sigma$ である。

η_{off} は η_p (点線) よりわずかに大きい値を取っているが、 η_p を平行移動させる (実線) と一致する。このことより off-mode では poisson 分布をしているといえる。 η_{on} も、 η_p (点線) より大きい値を取っており、 η_p を平行移動させる (下側の実線) と、bin 幅 t の小さい所では一致する。しかし、 $t \sim 1$ 秒あたりから、誤差の範囲内ではあるが、一つの傾向としてその傾きが変化し (上側の実線) η_p からずれていく。このような傾向は on-mode に特徴的であるので、Cyg X-1 の時間変動の特徴を表わしていると考えられる。

(2) 自己相関関数

軟 X 線領域の研究でも見られるように、時間変動の解析に自己相関関数が用いられている。自己相関関数の形は時系列データの性質にかかわっており、白色雑音の場合にはラグ時間 $\tau=0$ 以外はすべて零値となる。また、ランダム雑音は前の時刻の性質をある割合で保存している自己回帰過程であることが多いが、その場合にはラグ時間 $\tau=0$ から指数関数で減少していく。変動に規則正しい周期性がある場合には、自己相関関数はその周期で振動していく [18]。

我々は、自己相関関数として“Partially unbiased” autocorrelation function $\tilde{\rho}'_u$ を用いた。いま、 \bar{x} を bin 当りの平均カウント数、 x_i を i 番目の bin のカウント数、 N を bin の数とすると、 $\tilde{\rho}'_u$ は

$$\tilde{\rho}'_u \equiv \tilde{R}'_u / \tilde{R}_0$$

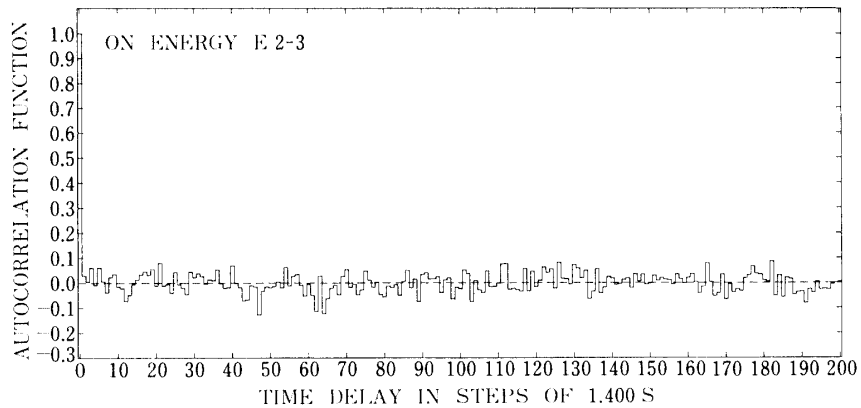
$$\tilde{R}'_u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-u} (x_i - \bar{x})(x_{i+u} - \bar{x}) + \frac{(N-u)}{N^2(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

で定義されている。ここに \tilde{R}_0 はラグ時間 $\tau=0$ のときの値である [5]。

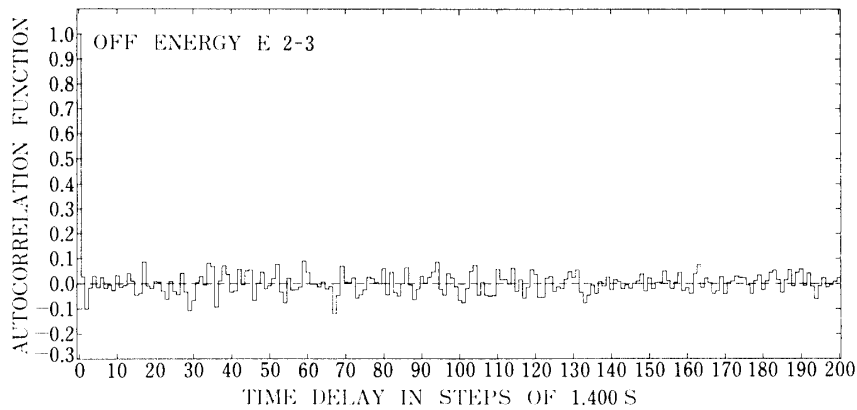
第5図は1.4秒の bin 幅でとった、(a) on-mode, (b) off-mode の自己相関関数である。両 mode とも $\tau=0$ 以外では小さな値をとり、 τ が大きくなるに従い、0 に収束していく。このことより Cyg X-1 の時間変動は基本的にはランダムであるといえる。しかし、(a), (b) を比較してみると、on-mode では十数 bin 程度の幅で振動しつつ 0 に収束していくように見えるのに対し、off-mode では一様に 0 に収束している。このことは、Cyg X-1 の時間変動に、定常的ではないが、十数秒程度の周期性のある変動が含まれていることを示唆している。

(3) フーリエ変換によるスペクトル解析

この周期性を明確にするために高速フーリエ変換(FFT)を用いて PSD を求めたのが第6図である。(a) は on-mode, (b) は off-mode である。PSD は次のようにして求めた。



(a) on mode



(b) off mode

第5図 自己相関関数

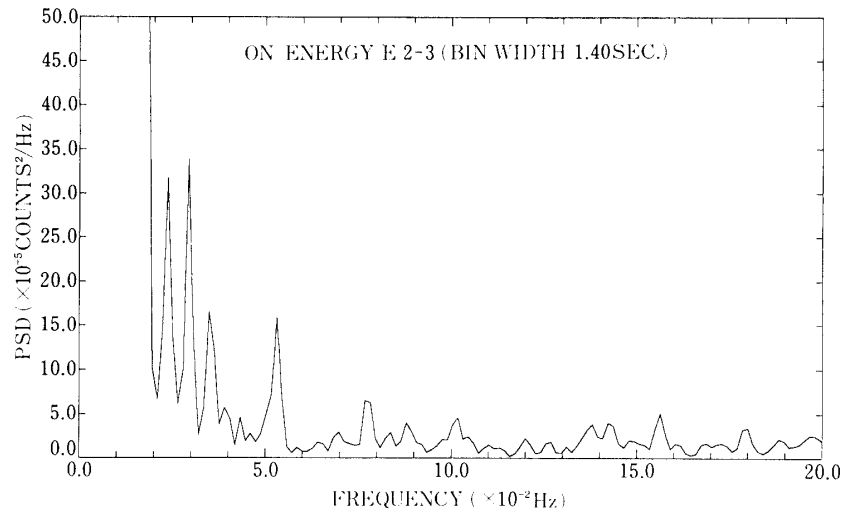
まず、データを幅 1.4 秒の bin に分け 625 bin のデータ列とし、それを 5 個の部分に分割した。各部の bin 列の初めと終りの各 1/10 の bin に cosin 型の窓関数をかけ、その両側に零値のデータを追加し、FFT により生の PSD を求めた。このようにして得られた 5 個のデータ列に対する生の PSD を平均して、PSD を求めた。

これらの操作により、有限な長さのデータを FFT にかけることにより生じる影響が小さくなる。また、生の PSD では推定誤差が 100% であるのに対し、求めた PSD では約 45% となった。[18]

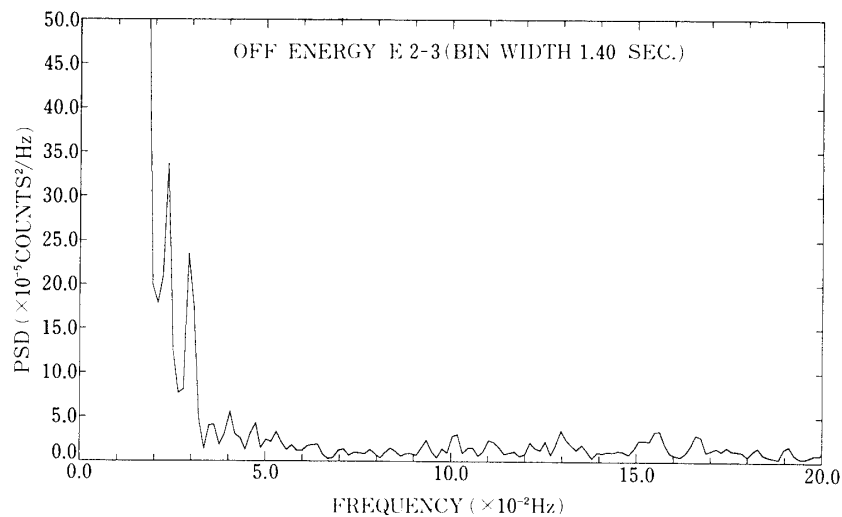
第6図(a)、(b)を比較して明らかな差は、(a)に於いて、 5.3×10^{-2} Hz にピークが見られる事である。このピークは平均値より、 11σ ほど大きい。

この周期の前後の時間幅で、on-mode のデータを重ね合わせてみた結果得られた図が第7図である。重ね合わせの時間幅は、19.16 秒である。Cyg X-1 の成分のうち、37% が周期的変動に含まれている。

いま、この変動が sin 関数で表わされる変動であると仮定して、シミュレーションしたも



(a) on mode



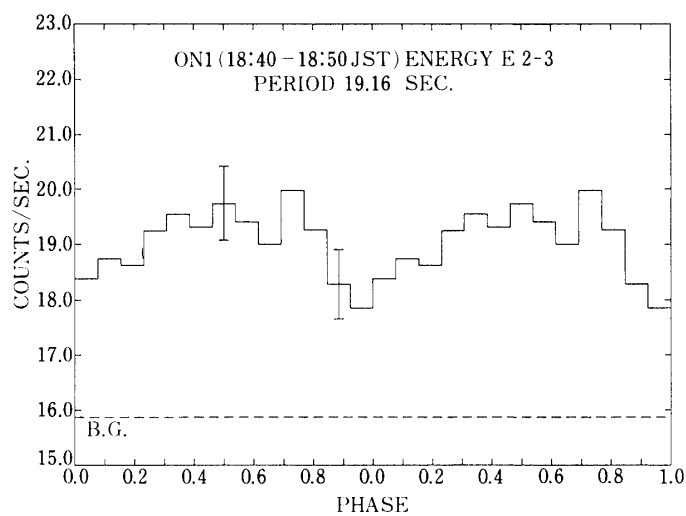
(b) off mode

第6図 パワースペクトル密度関数

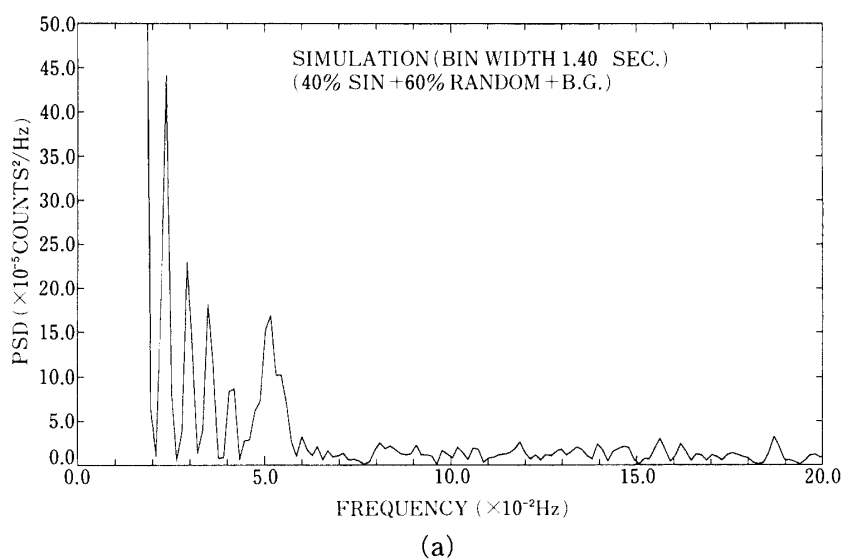
のが第8図である。(a)は、poisson乱数により、バックグラウンド成分と Cyg X-1 の成分の60%を連続成分として含む疑似データを作り、それに Cyg X-1 の成分の40%が、 5.3×10^{-2} Hz の振動数で変動しているとして加え、観測データと同じ方法で PSD を求めたものである。(b)は、バックグラウンド成分に、100%連続成分として Cyg X-1 の成分を加えて求めたものである。第8図(a)は(b)に比べ、第6図(a)をよく再現している。

(4) 解析のまとめ

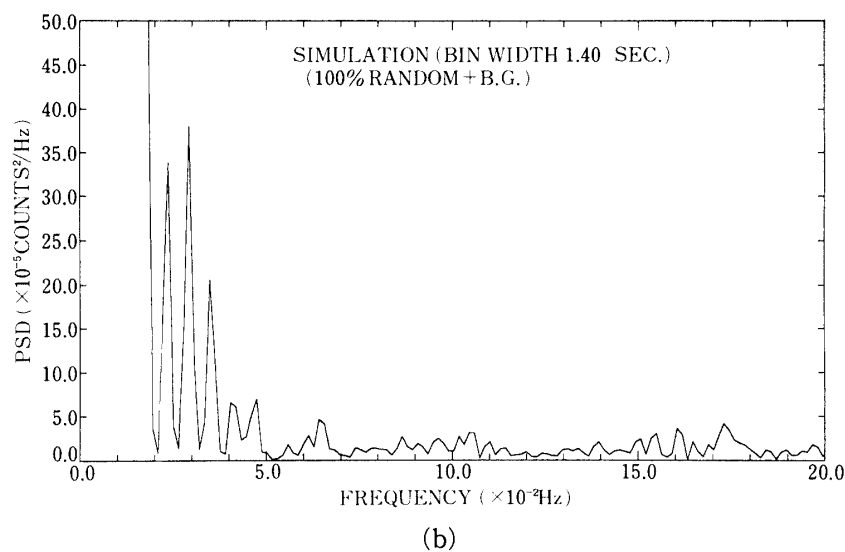
(1)~(3)までの解析の結果、on-mode のデータの時間変動の特徴的時間として、~1秒程度と19秒程度が得られた。特に19秒の変動は周期性を持つことが示された。HK デー



第7図 19.16秒の重ね合わせ



(a)



(b)

第8図 シミュレーションによるパワースペクトル密度関数

タに見られるように Cyg X-1 の観測時間中ゴンドラは安定した状態を保っており、観測器系に対する外部からの擾乱による周期性とは考えられない。したがって、この変動時間は Cyg X-1 の特徴的な変動時間といえる。

4. 考 察

3. で得られた結果は、1972 年 10 月 7 日に行なわれた我々の観測とよく一致している [12]。また、変動の特徴的時間として 17 秒附近の変動が、藤井と西村 [15] 及び Frontera 等によって報告されている [13][14]。藤井と西村は、1971 年 9 月 18 日に観測を行ない、1 分程度持続する、17.2 秒の変動がしばしば表われることを見出し、Frontera 等は、1971 年 9 月 20 日、1972 年 6 月 30 日、1973 年 6 月 30 日の観測で、 17.3 ± 0.3 秒の変動が 1 時間ほど続いていることを報告している。これらの観測結果は、周期性をもつことに共通点がある。観測は、1971 年 9 月から 1973 年 6 月にかけて、ほぼ半年毎に行なわれており、Cyg X-1 はその間 low state であった。観測したときに、偶然に周期性が表われたとは考えにくいので、この周期性は low state 状態に Cyg X-1 があるとき、その変動に常に含まれていると思われる。

観測時の binary phase はそれぞれ、0.55(中川)、0.81(藤井)、0.21, 0.93, 0.11(Frontera) であり、今回の観測は、0.33 である [19]。これらの binary phase を見た限りでは、17~19 秒の変動は binary phase に関係なく起っているといえる。このことは、17~19 秒の変動が、Cyg X-1 の硬 X 線発生領域自体によるものであることを示唆している。

Cyg X-1 の一般的なモデルとして、accretion disk モデルがあげられる [20]。accretion disk の中心部は、高温で、光学的に薄く幾何学的に厚い内側の部分と、低温で、光学的に厚く幾何学的に薄い外側の部分からなっており、外側の部分で熱的に放出された軟 X 線が、内側の高温の電子と Comptonization して硬 X 線を発生すると考えられている。

Thorne と Price は、Cyg X-1 の変動の時間 scale を、(i) 数週間から数カ月、(ii) 数十秒から数百秒、(iii) ミリ秒に分けている。そして (ii) と (iii) の間の time scale は、disk 内に生じた hot spot が 1 回又はそれ以上 disk 内を回転しつつ、消滅するその時間であると予想している [21]。hot spot の生成のモデルについては、Thorne と Price は示していないが、例えば次のようなモデルが考えられる。

Accretion disk 内部の対流運動とケプラー運動により磁場が強められ、その結果磁力線が disk の表面にループ状に押し出される。accretion disk の物質はその磁場にそって分布し、disk の表面に多数の高温のループ状の構造が形成される。そこから ~1 秒程度の固有時間をもつ硬 X 線が放出される [22]。いま、このようなループ状の構造が局所的に数多く発生し、その場所が disk と共に 19 秒程度で回転しながら、しだいに消滅していくとすると、定常的でない周期性を説明することができる。

5. お わ り に

我々は、Cyg X-1 の短時間変動をいくつかの方法で調べた。その結果、変動係数から ~1 秒程度の特徴的な変動時間を、また自己相関関数と PSD により、18.9 秒の定常的でない周期

的な変動が得られた。この19秒附近の変動は過去にも観測されているが、Cyg X-1の状態はすべて low state である。

軟 X 線領域の観測例が見当らず、今回の観測の state は不明であるが、エネルギー スペクトルによると high state の可能性もある[17]。もし high state であるならば、この19秒附近の変動は、binary phase, state 共に関係なく起っている普遍的な変動であるといえる。

high state に於ける硬 X 線領域の観測が望まれる。

謝 辞

実験の際には、宇宙科学研究所の西村研究室および広沢研究室の方々に協力していただきました。また、データ変換の際には、近藤一郎先生に多くの助言をしていただきました。ともに感謝しています。

参 考 文 献

- [1] N. J. Terrell, Jr 1972 Ap. J., **174**, L 35
- [2] M. C. Weisskopf, S. M. Kahn and P. G. Sutherland 1975 Ap. J., **199**, L 147
- [3] R. E. Rothschild, E. A. Boldt, S. S. Holt and P. J. Serlemitsos 1977 Ap. J., **213**, 818
- [4] Y. Ogawara, K. Doi, M. Matsuoka, S. Miyamoto and M. Oda 1977 Nature, **270**, 154
- [5] P. G. Sutherland, M. C. Weisskopf and S. M. Kahn 1978 Ap. J., **219**, 1029
- [6] K. Doi 1980 Nature, **287**, 210
- [7] M. C. Weisskopf, P. G. Sutherland, J. L. Katz and C. R. Canizares 1978 Ap. J., **223**, L 17
- [8] W. Priedhorsky, G. P. Garmire, R. Rothschild, E. Boldt, P. Serlemitsos and S. Holt 1979 Ap. J., **233**, 350
- [9] R. E. Rothschild, E. A. Boldt, S. S. Holt and P. J. Serlemitsos 1974 Ap. J., **198**, L 13
- [10] J. F. Meekins, K. S. Wood, R. L. Hedler, E. T. Byram, J. D. Yentis, T. A. Chubb and H. Friedman 1984 Ap. J., **278**, 288
- [11] C. R. Canizares and M. Oda 1977 Ap. J., **214**, L 119
- [12] M. Nakagawa, H. Sakurai and M. Uchida 1979 Advances in Space Exploration, **3**, 501 (Pergamon Press)
- [13] F. Frontera and F. Fuligni 1975 Ap. J., **198**, L 105
- [14] F. Frontera and F. Fuligni 1981 Space Sci. Rev., **30**, 379
- [15] M. Fujii and J. Nishimura private communication (1971)
- [16] P. L. Nolan, D. E. Gruber, J. L. Matteson, L. E. Peterson, R. E. Rothschild, J. P. Doty, A. M. Levine, W. H. G. Lewin and F. A. Primini 1981 Ap. J., **246**, 494
- [17] M. Nakagawa, H. Sakurai and M. Uchida 1985 ISAS report, **13**, 119
- [18] M. Hino "Spectrum analysis" 1977 ASAKURA Japan
- [19] D. R. Gies and C. T. Bolton 1982 Ap. J., **260**, 240
- [20] E. P. Liang and P. L. Nolan 1984 Space Sci. Rev., **38**, 353
- [21] K. S. Thorne and R. H. Price 1975 Ap. J., **195**, L 101
- [22] A. A. Galeev R. Rosner and G. S. Vaiana 1979 Ap. J., **229**, 318
- [23] M. Nakagawa, H. Sakurai and M. Uchida 1984 ISAS report, **11**, 71