

# 「すざく」によるマグネターの観測的研究

牧島 一夫

〈理化学研究所グローバル研究クラスターMAXI チーム 〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1〉  
e-mail: maxima@riken.jp



マグネターは、中性子星の中でも最も強い $10^{14-15}$  Gの双極子磁場をもち、磁気エネルギーを源にX線を放射するとされる天体である。それらの生まれ方、超強磁場の起源と保持方法、ふしぎな硬X線成分の放射機構、磁気エネルギー解放の仕組みと進化の道筋、激しいバーストの放射機構など、マグネターは多くの謎を擁し、天体物理学だけでなく、原子核物理学や超強磁場中での量子電磁気学、強磁性体の物性などとも関連が深い。「すざく」の観測を通じ、マグネターに関して多くの魅力的な作業仮説が提示された。それらの検証はASTRO-H衛星の主要テーマの一つとなろう。

## 1. はじめに

2005年に「すざく」が誕生したとき、マグネターという不思議な天体の面白さを、恥ずかしながら私はまだまだあまり認識していなかった。そんななか、本務地の東京大学では榎戸輝揚氏（現在は京大）、兼務地の理化学研究所では中川友進氏（現在はJAXA）という二人の若手からその面白さを教えてもらい、さらに何人かの若手と共同研究を行った結果、今ではマグネターの研究にどっぷり漬かっている。それら若手に感謝しつつ、「すざく」で得られたいくつかの魅力的な仮説を紹介し、そのASTRO-Hなどによる検証への期待を述べたい。

## 2. マグネターとは

マグネター（磁石星と呼ぼう）とは、 $P=2-11$  sという遅い自転周期と、高いスピンドウン率 $\dot{P}$ をもつ特殊な中性子星（NS）で、X線は出すが電波は弱く、銀河系とマゼラン雲に $\sim 30$ 個が知られる<sup>1-4</sup>。数個は超新星残骸（SNR）の中心にあり、また $P$ と $\dot{P}$ で決まる特性年齢が $10^{3-5}$ 年なので、若い種族である。 $P$ と $\dot{P}$ から推定される双

極子磁場が $B_d=10^{14-15}$  Gに達しており、X線光度がスピンドウン光度を大きく上回るのに連星や降着の徴候がないので、磁石星は磁場をエネルギー源として輝く磁気駆動NSと考えられる<sup>1-4</sup>。

磁石星の多くは、時折マシンガンのようにX線の「ショートバースト」を連射し、古くから「ソフトガンマ線リピーター（SGR）」の名称で知られていた。その代表例であるSGR 1860-20の同定では、「あすか」により村上敏夫氏らが先駆的業績を上げている<sup>5</sup>。近年、突発的なバーストを手掛かりに、Swift衛星などで新たに発見されるトランジェント磁石星も急増している。また別の一群の磁石星は古くから「異常X線パルサー（AXP）」として知られており、「ぎんが」衛星などでパルスのドップラーを探索したが、連星の証拠がなく<sup>6</sup>、奇妙な天体とされてきた。1990年代半ば、これらが磁気駆動NSであると提唱したのは、ThompsonとDuncanの卓見と言えよう<sup>4</sup>。

「すざく」の打上げ直前、重要な発見があった。それまで磁石星の定常放射のスペクトルは、温度 $\sim 0.5$  keVのソフトな黒体放射で近似できるとされていたが、欧州のガンマ線衛星INTEGRALにより複数の磁石星から、 $>10$  keV領域に異常に

硬い硬X線成分が検出されたのである<sup>7)</sup>。

### 3. 「すざく」による観測

「すざく」による磁石星の観測は、榎戸・中川の両氏の先導のもと、三つの形態で行われた。個別の観測提案<sup>8),9)</sup>、2009年にキーププロジェクトとして採択された「マグネター大研究」<sup>10),11)</sup>、そして新しい磁石星の出現や既知天体の突発的な増光に対応した数回の緊急観測である<sup>12),13),16)</sup>。なかでも緊急観測は有効で、2008年8月に出現したSGR 0501+4516では半日の観測で3本の論文<sup>13)-15)</sup>、2009年1月に活性化した1E 1547-5408では1日の観測で4本の論文<sup>16)-19)</sup>が生産され、もう1本が印刷中である。詳細は別記事<sup>2),3)</sup>を参照されたい。中川らは、ガンマ線バースト専用機HETE-2<sup>20)</sup>や他衛星<sup>21)</sup>のデータも援用した。

観測を進めるに際してわれわれが特に意識したのは、次のような疑問に答えることであった。

- Q1 磁石星は本当に超強磁場をもち、磁気エネルギーで駆動されるNSなのか。
- Q2 バースト活動はどのように引き起こされ、それと定常放射はどんな関係をもつか。
- Q3 INTEGRALの発見した硬X線成分は、どのような放射機構で作られるか。
- Q4 磁石星はどんな親星の超新星爆発で作られ、通常の中性子星と生成条件がどう違うか。
- Q5 磁石星は電波パルサーなど $B_d \sim 10^{12}$  GのNSと、別種族か連続的につながるか。
- Q6 磁石星を含むNSの超強磁場は、いかに作られ、どうやって保持されるのか。

これらは大質量星の最期という天文学の基本課題に加え、核物質の磁性、臨界磁場 $B_c = 4.4 \times 10^{13}$  Gを越す超強磁場の下での量子電磁気学(QED)、高密度フェルミ系の多体問題など、物理学の広い分野に関係する設問である。いずれも一朝一夕に決着する問題ではないが、われわれは「すざく」による観測を進める中で、答えに近づこうと有用な、いくつかの魅力的な仮説を構築

することができた。以下それらを四つの観点から述べたい。

### 4. 硬X線スペクトル成分

観測を開始するや、磁石星は「すざく」にとって絶好の天体であることがわかった。図1は代表的な磁石星である4U 0142+61のスペクトルで<sup>8)</sup>、このように約10 keVを境に軟X線成分と硬X線成分の卓越する帯域が、X線CCDカメラ(XIS)および硬X線検出器(HXD)の帯域と、偶然だが見事に一致していたのである。しかも硬X線成分は、まるでHXDの検出限界をなぞるように、高エネルギーに向けて駆け上がっていた。

おかげでINTEGRALの発見を追認し、磁石星が普遍的に硬軟2成分のスペクトルを示すことを突き止めるだけでなく、新たに予想外の「進化」を発見することができた<sup>2),3),10)</sup>。すなわち老齢の磁石星になるほど、軟X線成分に比べて硬X線成分の相対光度は下がるが、硬X線スペクトルはさらに硬くなり、あたかも数百keVにピボットがあるように見えるのである。年齢とともに硬X線成分の光度が下がるのは自然だが、スペクトルが硬くなるのは異常である。さらに図1の例では硬X線成分のスペクトルは光子指数 $\sim 0.5$  (光子数密度 $\propto E^{-0.5}$ ;  $E$ はエネルギー)まで硬くなり、

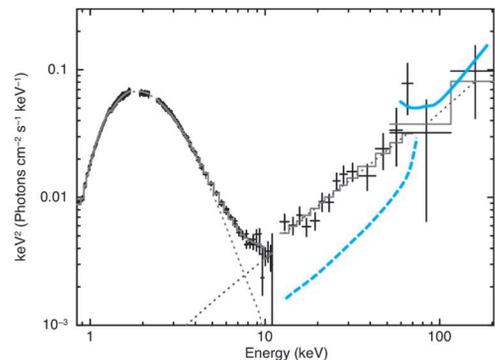


図1 「すざく」で得た4U 0142+61のX線スペクトルを $\nu F_\nu$ 表示したもの<sup>8)</sup>。10 keVより下がXIS、上がHXD。HXD-PINとHXD-GSOの検出限界を、青破線と青実線で示す。

シンクロトロン放射や逆コンプトン過程など通常の非熱的過程では説明がつかない。

そこでわれわれはこの硬X線成分は、低エネルギーの粒子や光子が高いほうへ叩き上げられた結果ではなく、高エネルギーガンマ線が逆に低いほうに叩き落とされることで作られると着想した。典型的な磁石星では電波パルサーに比べ、自転速度は2桁遅いが磁場は2桁強いから、星表面での誘導電場の強さは同程度であり、パルサーの場合と同様に電子の加速、ガンマ線の生成、電子陽電子対 ( $e^+e^-$ ) の生成などが起きると期待される。他方で磁石星ではパルサーに比べて遠心力が4桁も低いから、粒子たちは外に逃げ出せず星表面に落下し、 $e^+$ は511 keVガンマ線を生成するだろう。パルサーであればこの511 keV光子が改めてカスケードして多数の $e^+e^-$ ペアを生み電波を放射するはずだが、 $B_c$ を越す強磁場があると以下のように、それと競合する過程が起きると期待される。

QEDによれば光子は常に、不確定性原理で許される短時間だけ、 $e^+e^-$ ペアに化けてすぐ元に戻る過程を繰り返している。ところが超強磁場があると、ある光子(光子0)が分裂してできた $e^+$ や $e^-$ は、再結合する前に磁場に曲げられ、ある確率で光子(光子2)を出してしまう。つまり化けたとき「シッポ」が出てしまうため、元の光子0に戻れず、エネルギーが減った光子1になる。結果として光子0が光子1と光子2に分裂することになり、0のエネルギーは1と2に分配される。これが二光子分裂と呼ばれる過程である。

そこでわれわれは、「仮説1: 磁石星の硬X線成分は、511 keVガンマ線が超強磁場中でQEDの予言する二光子分裂を繰り返し、エネルギーを下げた結果かもしれない」に到達した<sup>10)</sup>。その検証方法は明確で、間もなく打ち上げられるASTRO-Hでは、搭載される軟ガンマ線検出器(SGD)で、明るい磁石星は十分に~600 keVまで検出が期待される(「すざく」では難しい)。仮説1が正しければ、放射は511 keVより上でストンと落ちるはずで、これはQ3に対する強力な答えとなる。

れば、放射は511 keVより上でストンと落ちるはずで、これはQ3に対する強力な答えとなる。

## 5. バースト放射と定常放射

磁石星はいずれも、ほぼ定常的なX線放射と、マシンガンのようなバースト放射の二つの放射形態をもつ。バースト活動が急増するときは、定常放射も増光するので、両者が大まかに関連していることは疑いないが、詳細な関係は不明であった。

INTEGRALに比べ「すざく」は、ずっと短時間でワイドバンドの天体検出を可能とする。そのため活動期の磁石星が放つバーストのうち、小さなものを研究することが可能になり(強いバーストでは装置が飽和)、図2のように、定常放射も暗いバーストも、ともに軟X線成分と硬X線成分からなる特徴的な2成分を示すことが発見された<sup>15), 17)</sup>。これは太陽のマイクロフレアをお手本に導かれた「仮説2: 磁石星の定常放射は、微小なバーストの重ね合わせかもしれない<sup>21)</sup>」という考えを強化するものである。ただしこの仮説の検証は必ずしも容易ではない。

こうした観測により、定常放射とバースト放射にさらなる共通性が発見された。すなわち放射の

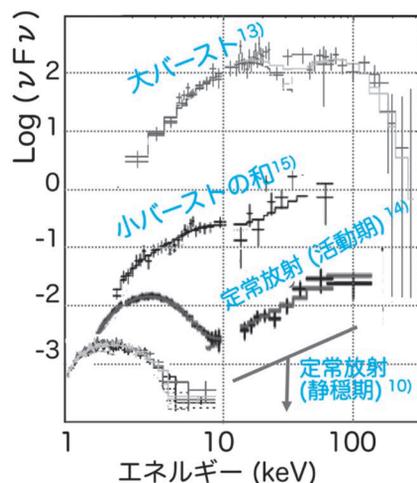


図2 「すざく」で得た、磁石星SGR 0501+4516のバーストおよび定常放射の $\nu F\nu$ スペクトル。

軟X線成分は通常、低温 $T_L$ と高温 $T_H$ の2温度の黒体放射で近似でき、 $T_L \approx 0.4 T_H$ という比例関係が成り立つという発見である<sup>21)</sup>。球対称を仮定したときの黒体半径は、低温成分では数km、高温成分ではその1桁下であり、大まかにNS表面からの熱放射と考えてよい。とすると2温度が現れるのは、強磁場中で電子による光子の散乱断面積が光子の偏光に強く依存する結果の可能性があり、「仮説3: 二つの温度は偏光モードに依存した二つのphotosphereを見ているためと考えられ、よって軟X線成分は強く偏光しているはず<sup>4)</sup>、<sup>13)</sup>と予言される。これに対しては、理研の玉川徹氏や名古屋大の田原譲氏らが、米国とともに計画中の軟X線偏光衛星PRAXySにより、答えが得られよう。以上二つの仮説は、Q2を解くうえで重要と考えられる。

## 6. マグネターの形成過程

磁石星のうち数個はSNR中にあり、これらSNRを調べることは、Q4への手掛かりとなる。図3はその代表例で、1E 2259+586と呼ばれる磁石星が、天球面上でCTB 109と呼ばれるSNRの中央に位置し、両者は偶然に重なったものとは考えにくい。

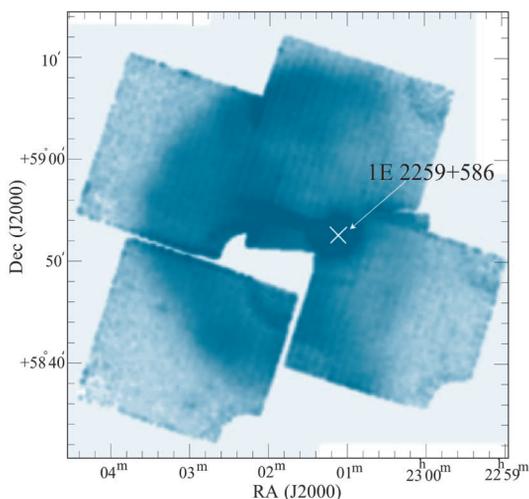


図3 「すざく」XISで得たCTB109と1E 2259+589の0.5-4 keVのモザイク画像<sup>23)</sup>。

ところが1E 2259+586の特性年齢 $\tau_c \equiv P/2\dot{P} = 230$  kyrはCTB 109の推定年齢 $\tau_{\text{SNR}} \sim 13$  kyr<sup>22), 23)</sup>より大幅に長い。この重大な矛盾を以下のように明快に解決したのは、中野俊男氏であった<sup>23), 24)</sup>。

$\tau_c$ は一般に $B_d$ が一定として算出しているが、磁石星が磁気駆動天体なら、磁場は時間減衰するはずである。 $\dot{P} \propto P^{-1} B_d^2$ なので、すると $\dot{P}$ は思っていたより早く0に近づき、結果として $\tau_c$ が真の年齢より過大となるのである。じっさい1E 2259+586が13 kyrの昔に、 $B_d \sim 10^{16}$  Gの超強磁場と $P \sim$ 数msの速い自転で生まれ、磁気双極子放射で急速にスピンドアウンして現在の $P = 6.98$  sに達し、その間に磁場が時間のべき関数で減衰してきたと考えると、見かけの長い特性年齢 $\tau_c$ が説明できることが示された<sup>23), 24)</sup>。

この成果は三つの意味をもつ。一つ目はこれが、磁場エネルギーを消費して輝くという磁石星の本質を支持し、Q1の答えの一つとなることである。2番目にこのシナリオは、磁石星のspin周期が $P = 2-11$  sの範囲にそろっているという事実を自然に説明できる。第3に、磁石星の年齢が系統的に過大評価されているなら、彼らは思ったより以上に若い天体で、数十kyrの短時間で磁気活動を終え見えなくなる可能性が高いことである（spinが遅いため電波パルサーにはなれない）。

この3番目の示唆は、磁石星が高い生成率で大量に作られる可能性を意味する。すなわち「仮説4: 重力崩壊型で作られるNSのかかなりの部分が、電波パルサーではなく磁石星として誕生するのかもしれない」という、NSの認識を根底から揺さぶる可能性が浮上したのである。これを検証するには、磁気活動を終えた老齢磁石星が多数、銀河面に潜むことを示せば良い。そうした天体は、 $P \sim 10$  sのパルス、熱的な軟X線放射に加え、微弱ながら極めて硬い硬X線成分を示すはずで、ASTRO-H搭載の硬X線イメージャー (HXI) による探査に期待がかかる。

さらに中野氏は「すざく」によりCTB109を追

観測し、X線放射プラズマを星の放出物と加熱された星間ガスとに分離し、前者を丹念に加算した結果、CTB 109/1E2259+586系の親星は、太陽の～40倍もの初期質量をもっていた可能性を突き止めた<sup>24)</sup>。そのような大質量星は通常、中心にブラックホールを残すとされるので、NSを残すためには、大きな質量を速い回転や強い磁場で放出する必要がある、「仮説5: 磁石星を擁するSNRには、過剰な爆発エネルギーの痕跡が潜んでいるのでは」に行き着く。「すざく」のデータから推定されたCTB 109の爆発エネルギーは～ $1 \times 10^{51}$  ergと平凡だが、ASTRO-Hの高精度軟X線分光計(SXS)でプラズマの膨張速度や乱流、イオン温度などを初めて測定すれば、この値が改訂される可能性があり、Q4の答えに近づくことができるかもしれない。

## 7. マグネターのトロイダル磁場

上述の「老いた磁石星」は、すでに発見されつつあるとも言える。というのも近年、通常パルサー並の $B_d = 10^{12-13}$  Gの「弱磁場磁石星」(自己矛盾した呼び方だが)が3例も発見されたからである<sup>25)</sup>。 $B_d$ が弱いのに磁石星とみなされるのは、それらが突然に覚醒してバースト活動を起こすため、 $B_d$ は減衰したが内部にはまだ強いトロイダル磁場 $B_t$ が残り、バーストはそれをエネルギー源としているのだろう<sup>25)</sup>。また磁気エネルギーの解放が、星の内部ないし外部での磁場リコネクションによるものなら、隣接する磁力線が反平行な成分をもたねばならず、 $B_d$ に加え $B_t$ が必要となる。こうした $B_t$ は、大質量星のコアが重力収縮の際、微分回転により作られると考えられ<sup>26)</sup>、磁石星にとって本質的な問題といえる。

われわれは最近、より直接的な $B_t$ の推定方法を開発した<sup>11)</sup>。それは、 $B_d$ は星を扁平に、また $B_t$ は縦長に変形させる<sup>3)</sup>という性質を利用するもので、軸対称な剛体の対称軸 $\hat{x}_3$ 方向の慣性能率を $I_3$ 、直交方向の慣性能率を $I_1$ とすると、変形量

は $\varepsilon \equiv (I_1 - I_3)/I_3 \sim 1 \times 10^{-4} (B_t/10^{16} \text{ G})^2$ と概算される<sup>3), 11)</sup>。角運動量を $L$ とすると、そのような剛体は $P_1 = 2\pi I_1/L$ と $P_3 = 2\pi I_3/L$ という二つの固有周期をもち、両者は相対的に $\varepsilon \equiv (I_1 - I_3)/I_3$ だけ異なる。 $P_1$ は歳差周期で、 $\hat{x}_3$ が $L$ の回りに一定の「首振り角」 $\alpha$ で回転する効果を表し、パルサーがパルスするのはそのためである。他方 $P_3$ は $\hat{x}_3$ の回りの剛体の自転を表す。剛体の回転運動は一般に $P_1$ と $P_3$ の混合で記述でき、 $\alpha \neq 0$ の場合は自由歳差運動と呼ばれる<sup>27), 28)</sup>。その身近な好例は図4のラグビーボールである。

X線の放射パターンが $\hat{x}_3$ の周りに軸対称だと、 $P_3$ は検出できず、 $P_1$ だけ見える。ところが放射パターンが対称性を破ると、 $L$ と $\hat{x}_3$ の張る面から見た放射の強度が、 $P_1$ と $P_3$ のうなりに当たる「スリップ周期」 $T \equiv P_1/\varepsilon = (1/P_3 - 1/P_1)^{-1}$ でゆっくり変化する(図4)。これが観測者からはパルス位相の進み遅れ、すなわち位相変調として観測され、自由歳差運動が検出できるのである。この効果は最初4U 0142+61から発見され<sup>2), 3), 11)</sup>、 $P = 8.689$  s、 $T = 55$  ks、 $\varepsilon = 1.6 \times 10^{-4}$ と求められた。二例目の1E 1547.0 - 5408では、 $P = 2.072$  s、 $T = 35$  ks、 $\varepsilon = 0.6 \times 10^{-4}$ である<sup>29)</sup>。よってどちらの天体でも $B_t \sim 10^{16}$  Gが示唆される。また両天体とも位相変調を示すのは硬X線成分のみで、さらに

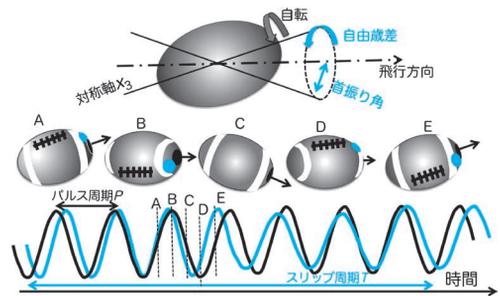


図4 ラグビーボールの首振り为例にとった、自由歳差運動の説明。黒い曲線は、対称軸上にある光源を観測者が見る強度、青い曲線は対称軸上にない光源(ボール先端近くの青丸)の強度を示す。

4U 0142+61では変調の振幅が年のオーダーで変化している。これは首振り角が変わるためではなく、 $\hat{x}_3$ 回りの対称性の破れの度合いが変化するためと考えられる。こうしてわれわれはQ1に対する強力な答えとして、「仮説6: 磁石星は強いトロイダル磁場をもつ結果、球対称から僅かに変形している」と提唱するに至った。現在「すぎく」の公開データで第3第4の例を探索するとともに、ASTRO-H HXIを用いたより詳細な観測を計画中である。

こう書くと最初から筋書きが整っていたように見えるが、実際は大違いである。4U 0142+61の硬X線パルスは、2007年のHXDデータでは検出できた<sup>10)</sup>のに、2009年の観測ではどうしても検出できない。私は2年以上もデータと格闘したあげく、硬X線パルスの位相が揺れている徴候に気づき、独自の解析により位相変調を検出したのである。それを自由歳差運動の解釈に結びつけられたのは、1979年に打ち上げられた初代の「はくちょう」がスピン衛星で、しばしば首振りにより衛星の姿勢が乱れ、その対処を通じ自由歳差の概念が身にしみていた結果といえる。自由歳差運動は剛体の力学の最も基本的な概念で、みな大学の初年次に学習するはずだが、きちんと理解している人は驚くほど少ない。特に大多数の人が、コマの首振りや地軸の動きなど、外力トルクに起因する強制歳差運動と混同している。

## 8. おわりに

駆け足ながら、設問Q1-Q4に対して魅力的な作業仮説が設定され、ASTRO-Hによる検証に臨む準備ができたことをお伝えした。Q5に関しては笹野理氏により研究され、「仮説7: 連星X線パルサーのうち $P > 1,000$  sの一群は、 $B_d \sim 10^{13}$  Gをもつ可能性があり、磁石星が連星中で生まれ進化したものかもしれない」が提唱された<sup>30)</sup>。ASTRO-H SGDで $> 100$  keVにサイクロトロン吸収構造が検出されれば、決定打となるだろう。残る

Q6はここで語るには大きすぎるが、NSが電磁石なのか永久磁石なのかを決めることが必須であろう。私は後者であると考えている<sup>31)</sup>。

## 参考文献

- 1) Mereghetti S., 2008, A&AR 15, 225
- 2) 榎戸輝揚, 2012, 天文月報105, 431
- 3) パリティ 2015年8月号, 「特集: マグネター」
- 4) Thompson C., Duncan R., 1995, MNRAS 275, 255
- 5) Murakami T., et al., 1994, Nature 368, 127
- 6) Koyama K., et al., 1989, PASJ 41, 461
- 7) Kuiper L., et al., 2006, ApJ 645, 556
- 8) Enoto T., et al., 2011, PASJ 63, 387
- 9) Morii M., et al., 2010, PASJ 62, 1249
- 10) Enoto T., et al., 2010, APJL 722, L162
- 11) Makishima K., et al., 2014, Phys. Rev. Lett. 112, 171102
- 12) Nakagawa Y., et al., 2009, PASJ 61, S387
- 13) Enoto T., et al., 2009, APJL 693, L122
- 14) Enoto T., et al., 2010, ApJ 715, 665
- 15) Nakagawa Y., Makishima K., Enoto T., 2011, PASJ 63, S813
- 16) Enoto T., et al., 2010, PASJ 62, 475
- 17) Enoto T., et al., 2012, MNRAS 427, 2824
- 18) Iwahashi T., et al., 2013, PASJ 65, 52
- 19) Yasuda T., et al., 2015, PASJ 67, 41
- 20) Nakagawa Y., et al., 2007, PASJ 59, 653
- 21) Nakagawa Y., et al., 2009, PASJ 61, 109
- 22) Sasaki M., et al., 2004, ApJ. 617, 322
- 23) Nakano T., et al., 2015, PASJ 67, 9
- 24) Nakano T., 博士学位論文, 東京大学理学系研究科 (2015年3月)
- 25) Rea N., et al., 2014, APJL 781, L17
- 26) Takiwaki T., et al., 2009, ApJ 691, 1360
- 27) ランダウ=リフシツ, 「力学」(東京図書)
- 28) <http://butikov.faculty.ifmo.ru/Applets/Precession.html> に良い動画あり
- 29) Makishima, K., et al., 2016, PASJ 68, in press
- 30) Sasano M., 博士学位論文, 東京大学理学系研究科 (2015年3月)
- 31) Makishima K., et al., 1999, ApJ 525, 978

### Suzaku Observations of Magnetars

Kazuo MAKISHIMA

RIKEN, MAXI Team, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: Through broadband X-ray observations of magnetars with *Suzaku*, several hypotheses have been derived. These will provide useful guidelines to future observations of these mysterious objects with ASTRO-H.