



天文学最前線【1】

## フレアの統一モデル

—太陽フレア、恒星フレア、原始星フレア—

柴田一成（京都大学）

### 1. はじめに

愛知教育大の沢さんから、最新の研究に関する執筆を頼まれた。ただでさえ宿題が山のようにあってどれも締切りを過ぎているような状態で、引き受けられるわけがないのだが、沢さんからの依頼とあっては、断るわけにもいかないし、福江君が私の原稿完成率を2割くらいだろうと予想している、と沢さんから聞くに及んで、皆さんその程度の覚悟を決めているなら、OKですよ、ととりあえず引き受けてしまった。しかしやっぱりこの原稿を書き出した時点ですでに締切りを1日過ぎている。午後10時だ。さてどうしようかと思っただが、天文教育にたずさわっている人々が読んで興味をもてそうな、あまり難しくない研究裏話のエッセイなら短時間で書けるかもしれないと思って、書き出した次第である。

### 2. 太陽フレア

最近5年ほどの私の研究の中心課題は、この太陽フレアである。太陽フレアとは太陽面爆発ともよばれ、太陽系最大の爆発だ。普通のフレアでさえも、水爆100万個以上を同時に爆発させたくらいのエネルギーが発生しており、今時（太陽活動極大期）なら毎日発生しているマイクロフレアでさえ、水爆数百個～数万個ものエネルギーを解放しているというものすごさである。これを実感するには、太陽X線観測衛星「ようこう」が撮影したX線ムービーを見るに限るが、本誌の読者にはすでになじみが深いと思う。もしまだ見たことがない人がいたら次のホームページ

<http://www.solar.isas.ac.jp/index.html>

を参照していただきたい。

この「ようこう」ムービーをはじめて見たときの感動を私は忘れることはできない。それは「ようこう」打ち上げ直後の1991年9月頃だった。太陽はこんなに激しく活動しているのか、と一瞬にして地球への影響の甚大さを悟った。と同時に、太陽は宇宙の中ではもっとも平凡な星なので、きっと宇宙の星々や様々な天体はわれわれのまだ知らない驚くべき激しい活動や爆発をしているのではないかと、とも思った。その直感が正しいことは、その後、時とともに次第に明らかになっていく。

さて「ようこう」ムービーを初めて見て以来、くる日もくる日も「ようこう」ムービーを見て暮らした。それは半ば仕事だった。実際、現在でも「ようこう」の内之浦運用当番の重要な仕事の一つに、「ようこう」データをチェックして太陽や観測機器に異変が起きていないか調べる仕事がある。打ち上げ直後は、関係者全員が運用当番みたいなものだったので、毎日「ようこう」ムービーを見て暮らしていたのだ。しかし、この仕事はわくわくする楽しい仕事だった。何しろ、太陽コロナの正体はこうだったのか、フレアはこんなふうにして起こるのか、という長年の謎が、ムービーを見ているだけで、まさに目からうろこ、という感じで次々とわかっていくのだから。新しい発見も次々とあった。10分間ムービーを見るだけで、論文が一つ書けそうな新しい発見が一つ見つかるくらいの頻度で、続々と新現象が見つかるのだ。そのたび

にノートにメモしていくのだが、新発見が数十もたまると、少々のことでは驚かなくなった。発見するのは容易だが、それを解析して論文にするのは時間がかかるので、結局、新発見の大半は今でもノートに埋もれたままになっている。結局、私自身および私の教え子達で論文にした新発見現象は、X線ジェット(図1)、アネモネ、X線プラズモイド(図2)、X線浮上磁場領域、くらいだろうか。それぞれ

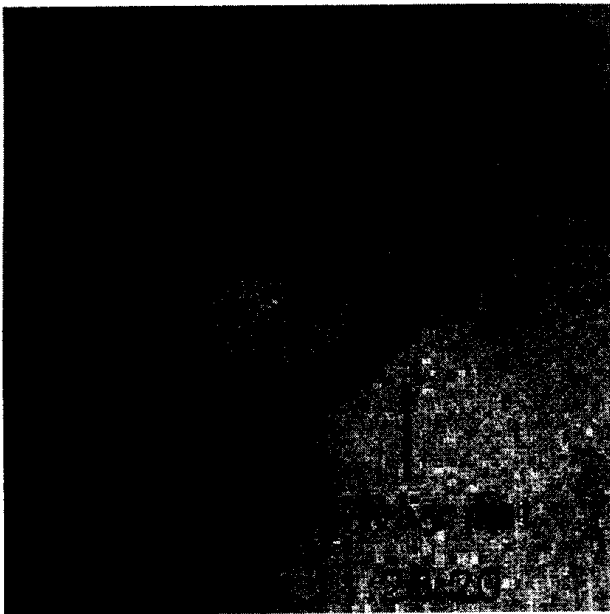


図1. X線ジェット(Shibata et al. 1992)。「ようこう」軟X線望遠鏡撮影

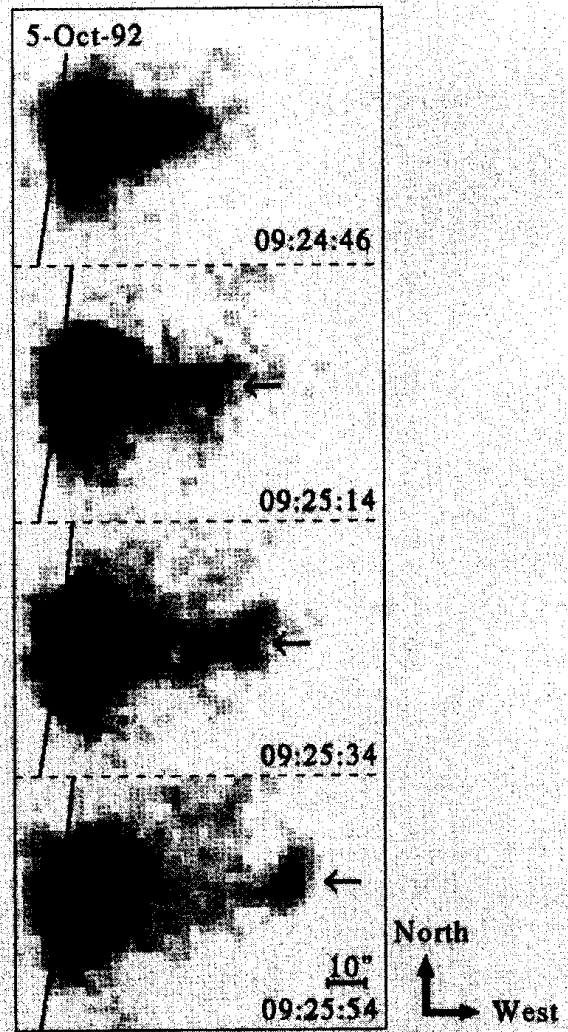


図2. X線プラズモイド(Ohyama and Shibata 1998)。「ようこう」軟X線望遠鏡撮影

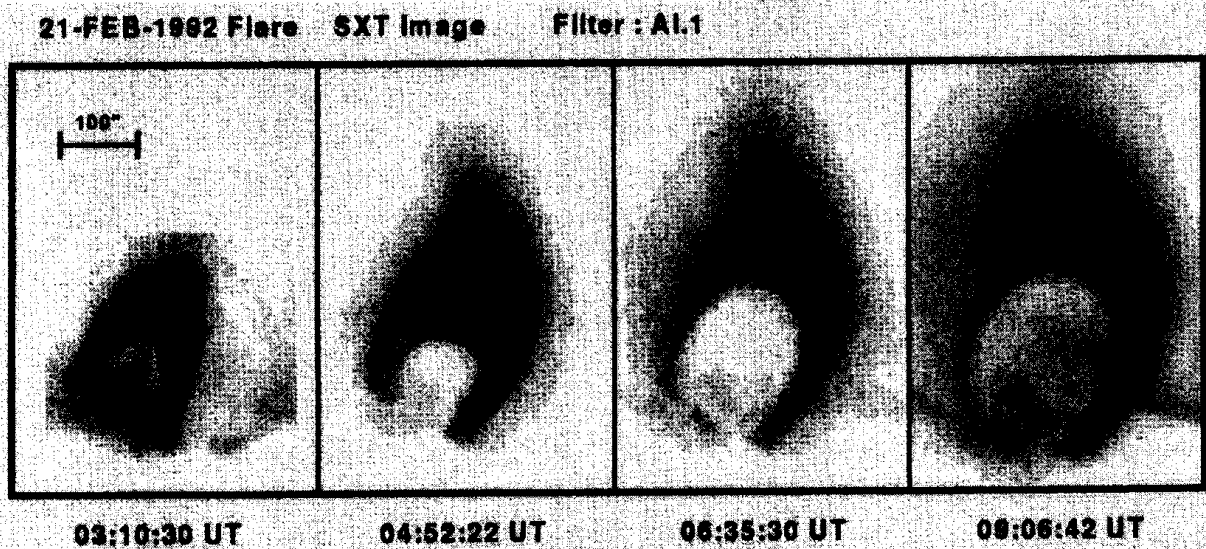


図3. カスプ型フレア(Tsuneta et al. 1992)。「ようこう」軟X線望遠鏡撮影

れのテーマで2、3編(あるいはそれ以上)の論文が出ている。もちろん、「ようこう」の他のメンバーが解析し論文にした新現象も数多い。カスプ(図3)、巨大アーケード、ループトップ硬X線源、トランジェント・ブライティング、X線活動領域膨張、などは重要な発見だ。これ以外にも新発見はまだまだあるが、今となつては、当時の発見の感動が薄れ、解析して論文を書こうという動機がしぼんでしまっているのがちょっと残念だ。何といつても、私の記憶の中から消えてしまっているのが信じられない。たまには昔のノートを読み返さないといけない。10年経つと人は別人になる、ということをもつて体験している今日この頃である。

少し脱線してしまった。主題の太陽フレアに戻ろう。「ようこう」ムービーを見るだけで一瞬にしてフレアのメカニズムがわかったのである。私だけでなくムービーを見た世界中の太陽物理学者がおそらく一瞬にして理解したに違いない。フレアのエネルギー源が黒点近くの太陽大気中に蓄えられた磁気エネルギーであることは、「ようこう」衛星打ち上げ以前からわかっていたが、その磁気エネルギー解放メカニズムが謎だったのである。有力な説は、「磁気リコネクション説」と「電流ショート説」の2つであった。後者はわかりやすい。雷みたいなものを連想すれば良いから。しかし前者はわかりにくい。わかりやすく説明しようとする、かえって泥沼にはまるので、ここでは簡単に、1)「プラズマ中の磁力線はゴムひもみたいなもの」、2)「プラズマは磁力線にくっついていて」、3)「逆向きの磁力線が接触すると、磁力線がなぎかわることがあり、これが磁気リコネクションである」とだけ書いておこう。これらを念頭において想像してほしい。リコネクションが突然起こると、磁力線がパチンコのゴムひものような形になって、そこにくっついたプラズマが急激に加速される(図4)。このように

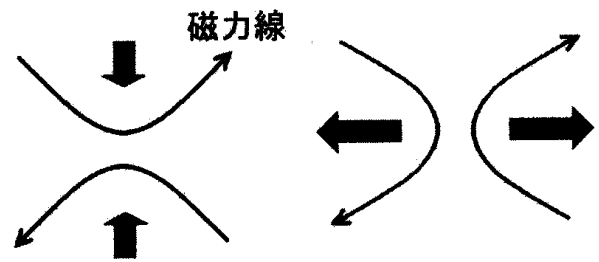


図4. リコネクションの概念図

して、磁気エネルギーが運動エネルギーに変換される。加速されたプラズマは黒点近くでは秒速1000kmを越えるスピードまで加速されるので、どこかにぶつくと強い衝撃波が発生し、ついには数千万度の超高温プラズマが発生するというわけだ。図3を見ると、まさにこのリコネクション説通りの様子が見える。図3で尖った形のループ(これをカスプという)が見えるが、これがまさにパチンコのゴムひもを引っ張った状態に対応する。尖ったカスプが丸くなるとエネルギーが解放される、というわけだ。

脱線するが、このような話を京大3回生の基礎宇宙物理学の講義で解説したら、講義レポートの講義の感想のところで、「パチンコ効果というのが最初意味がわからず理解に苦しみました。パチンコというと、町のパチンコ屋でやっているパチンコをつい連想してしまいます。」というのがあって、ひっくり返ったことがある。もう10年もしたら、本当にゴムひものパチンコは死語になるのかなあ。そうすると、リコネクションはどう説明すれば良いのだろうか？

さて、普通の解説文に書いてあるようなことは、できるだけ書かないエッセイにしようと思って書き始めたが、やはり「リコネクションとは何か」みたいな解説を書いた。でも、こればかりは仕方がないか。なにしろ「リコネクションとは何か」という問題は、私にとっては15年にわたる主要研究課題なのだから。太陽フレアに興味をもった

のも、実はこの「リコネクション」を解明したいと思ったのが最大の動機である。「リコネクション」は、太陽フレアだけでなく、オーロラを産み出す磁気圏サブストームの原因でもあるし、核融合プラズマの閉じ込めを失敗させる要因でもある。また、おそらく磁場をもつ多くの天体活動現象の爆発的エネルギー解放の原因の一つになっているに違いない。太陽フレアにおけるリコネクションを解明することによって、天体フレア現象を解明したい、というのが長年の私の夢だったのだ。もう少し正確に言うと、まだ10代の若かりし頃、遠方の銀河の中心ではとてつもない大爆発が起きており、そこから謎の高速ジェットが噴出している、ということを知り、小田稔さんや海部宣男さんの解説本から学んだとき、これぞ私が挑戦すべき宇宙最大の謎だと思った。その後、いろいろ勉強していくうちに、銀河中心

の爆発やジェットに良く似た爆発やジェットが太陽表面でも発生していることを知り、銀河の中心を解明する早道は太陽フレアを解明することだ、と思うにいたったのである。

さて脱線ばかりでなかなか前にすすまないが、ここまですべてをまとめると、「ようこう」の観測データによって、「太陽フレアが磁気リコネクションによって引き起こされていることがほぼ確かになった」。ただし、「ほぼ確か」というのがくせものだ。慎重な人は、「フレアにおける磁気リコネクションの証拠が数多く見つかった」としか言わない。図3のように、先

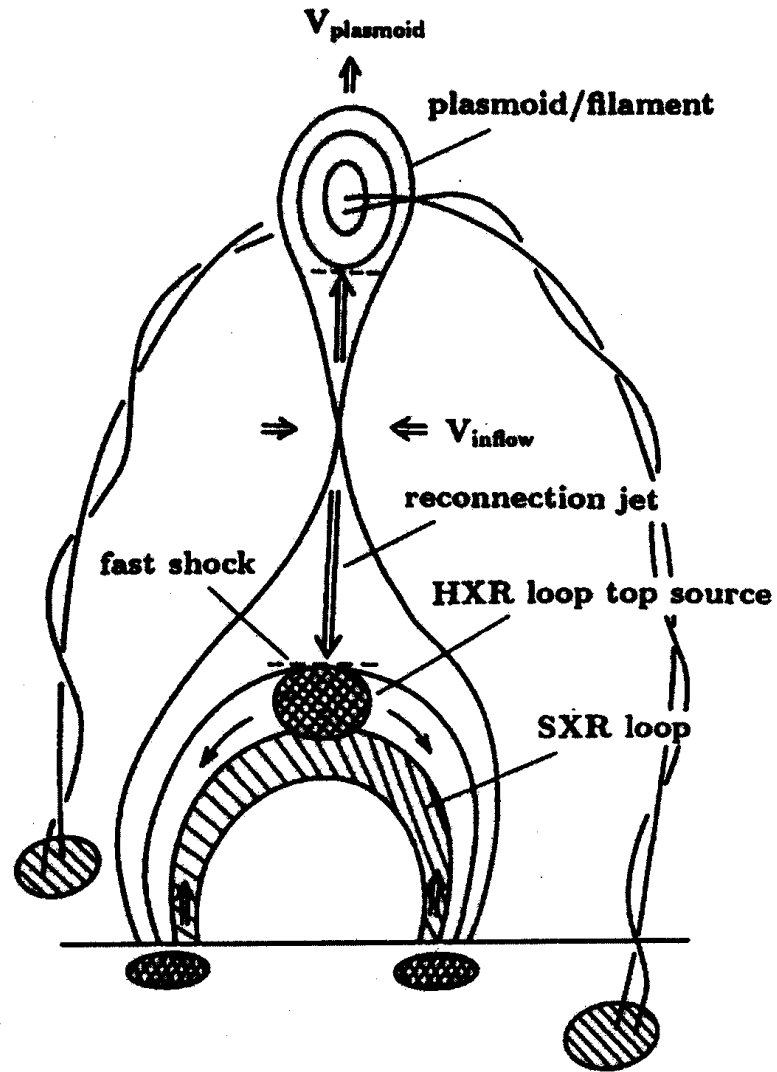


図5. フレアの統一モデル(Shibata et al. 1995)

の尖ったカスプ型のフレアは大きなフレアに限られる。ただ丸いループが光るだけという小さなフレアの方が数は多い。ここで詳しく解説している余裕はないが、色々調べていくと、そのような小さなフレアまで含めて、すべてのフレア現象は、やはり磁気リコネクションで説明できる、というのが、私の提唱する「統一モデル」(図5)だ。詳しくは、参考文献(柴田1996、柴田他1999)を読んでもらいたい。ただ、統一モデルの精神だけは書いておこう。やはり私は理論家である。それも物理学の単純さが好きである。それに対

してぐちゃぐちゃの化学は嫌いだ。物理学者が力の統一を目指すのと同じように、私はフレアの統一を目指している。自然はきっと単純で美しいに違いない、と。これまで、少なくとも自分自身で納得のできる範囲で、太陽フレアの統一モデルは完成したと思っている。理論的、観測的につめるべき課題は多数残っているが、大枠はわかった、と思っている。最近の5、6年は、日本中どこに行っても、世界中どこにいても、この統一モデルの話ばかりしているので、だんだん有名になってきた。「柴田の統一モデル」と呼ばれたりすることもある。結構大胆な話なので、自分でもやりすぎか、とも思うことがある。でも、フレア理論、リコネクション理論の世界的権威の英国のプリースト教授が、「I like your unified model!」と言ってくれたりすると、お世辞とわかっていても嬉しいものだ。頑張ってもまた大胆な講演をしようという気になる。逆のケースもある。例えば、私や学生の論文の審査で、論文に書いていない事柄に猛反発をくらうことがある。明らかに私の講演を聞いて憤慨したとしか思えないような反論がいっぱい書いてあるのだ。ルール違反じゃないか。審査は論文に書いてあることだけを対象にすべきなのに。結局、論文の受理まで余分な時間と労力を要することになる。でもそれもよしとしよう。科学だから論争があつてしかるべきだ。論争の結果、結局は正しいものが生き残る。私の統一モデルは生き残れるだろうか？自分ではなかなか面白いと思っている。結構いけるのではないかな。

世界にはまだアンチ・リコネクション派が山のようにいて、いつ私の足元をすくおうかと虎視眈々とねらっているが、私の興味はいつしか太陽フレアから恒星フレアへと拡大していた。太陽フレアだけでなく、ついに恒星フレアも統一できる！ということがわかったのだ。

### 3. 恒星フレアと原始星フレア

3年ほど前のある日、天文学会春の年会発表申し込み締切り日の前日の夜の12時頃だった。太陽フレア・コロナのようこう観測の総合報告論文を書いているときに、フレアの統計データに奇妙な傾向があることを報告している論文を見つけた。著者は米国NRL研究所のFeldman博士である。アンチ・リコネクション派のフレア観測の大家である。FeldmanはフレアX線データから得られる二つの観測量である、エミッション・メジャー(Emission Measure、以後EMと略す)と温度の間にゆるやかな相関があることを報告し、それが太陽フレアだけでなく、恒星フレアにものびていることを報告していた。EMはX線強度に比例する量で、厳密には電子密度の2乗に体積を掛けた量だ。図6を見ていただきたい。太陽フレアのEMを縦軸に、温度を横軸にプロットしたものである。弱い相関関係があることがわかる。Feldmanのこの図には4例の恒星フレアもプロットしてあるが、傾向が直線から少しずれている。しかし、この図の縦軸は対数スケールであるが、横軸は通常の線形スケールであることに注意すべきである。このグラフを見てただちに私は、これらのデータを両対数のグラフに写しとった(図7)。すると、太陽データと恒星データがほぼ一本の直線上にのるではないか。これは $EM \propto T^a$ 、すなわちEMが温度Tのべき乗に比例することを示している。多くの物理法則はこのような法則で表されること(ある物理量が他の物理量のべき関数で表されること)が知られているので、私はこの結果にきわめて満足した。さらに、この図に最近わが国の「あすか」衛星が発見した原始星フレアやTタウ型星フレアのデータをプロットしてみたら、これも同じ線上にのるではないか！原始星フレアは1億度もの高温にあり、放出されるエネルギーも太陽フレアのそれより1万倍以上もある謎の大フレアだ。それが同じ線

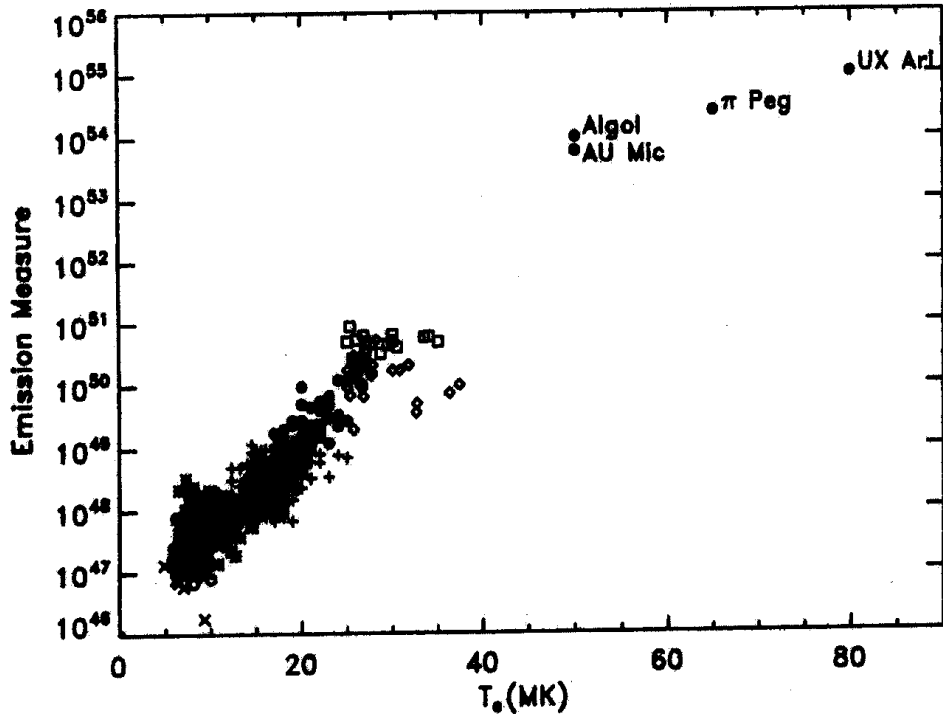


図6. 太陽フレア、恒星フレアのエミッション・メジャー (EM) と温度の相関関係 (Feldman et al. 1995)。片対数グラフであることに注意

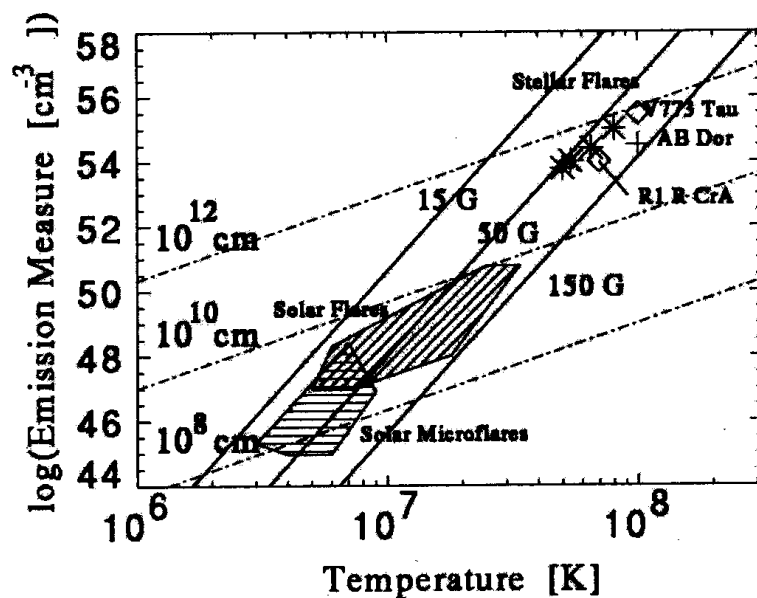


図7. 両対数にプロットした、太陽フレア、マイクロフレア、恒星フレア、原始星フレアのエミッション・メジャー (EM) と温度の相関関係 (Shibata and Yokoyama 1999)。実線 (磁場強度一定の線)、破線 (フレア・ループ長一定の線) は、リコネクション理論 (Shibata and Yokoyama 1999) に基づく。これより1億度の原始星フレアは、ループの長さが巨大であることがわかる。

上にのるということは、同じ物理で説明できるかもしれない、ということだ。つまり、太陽フレア、恒星フレア、原始星フレアが統一できるかもしれない!

深夜、それから紙と鉛筆の研究がにわかに始まった。総合報告論文の執筆などはそっちのけで。きっと単純な法則で決まっているに違いない、という予想の元に。その結果、予想通り、数時間で簡単な理論ができあがった。その理論は、その1年ほど前に共同研究者の横山博士と一緒に発見したフレアの温度に関する法則(横山-柴田のスケーリング則と勝手に名づけて呼んでいる法則)に基づくものだった。その理論では、フレア温度は磁気リコネクションによる加熱と熱伝導による冷却のバランスによって決まっている。先ほども書いたようにFeldmanは有名なアンチ・リコネクション学者である。論文にも、言外に(リコネクション説では)この観測事実は到底説明できないだろう、というニュアンスの文章が書いてある。そのFeldmanが発見したフレアのEM-温度の相関関係を、磁気リコネクション説をフルに用いて説明できたのだ。笑いが止まらなかった。のみならず、原始星フレアがなぜ1億度も高温にあり、解放するエネルギーが大きいのかもわかった。原始星フレアはとにかく巨大なのだ。太陽半径以上、最大ではその10倍近くにもなる。それが超高温と巨大エネルギーの原因であることがわかった。明け方、この最新成果を天文学会で発表するために急きょ徹夜で学会予稿を書き、何とか締め切りの正午までには予稿を電子投稿することができた。一夜漬けの研究だった。しかし、その一夜漬けの研究に至るには横山博士との共同研究、とりわけ、彼の成し遂げた世界最高の数値シミュレーションの結果が決定的に重要な役割を果たしたので、事後承諾で彼にも共同研究者に入ってもらい、論文もShibata and YokoyamaでAstrophysical Journal Letterに投稿した。予想通り、

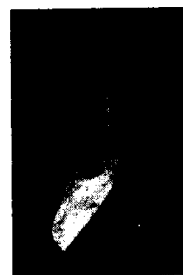
レフェリーからはリジェクトの連続だったが良く耐えて、結局1999年末には論文は無事Astrophysical Journal Letterに出版された(Shibata and Yokoyama 1999)。わずか4ページの短い論文だが、太陽フレア、恒星フレア、原始星フレアを統一するのに成功した論文として歴史に残る論文だと思っている。さて後世の評価はどうなるだろうか?

#### 4. おわりに

さて、書き始めてから5時間。締め切りからは1日以上過ぎたが、まだ間に合うだろうか? 一夜漬けのこんな原稿で許してくれますか?

#### 参考文献

- 柴田一成, 1996, 天文月報, vol.89, No.2, p.60  
 柴田一成, 福江純, 松元亮治, 嶺重慎編, 1999, 「活動する宇宙」, 裳華房  
 Feldman, U. et al. 1995, ApJ 451, L79  
 Ohyama, M. and Shibata, K. 1998, ApJ 499, 934  
 Shibata, K. et al. 1992, PASJ 44, L173  
 Shibata, K. et al. 1995, ApJ 451, L83  
 Shibata, K. and Yokoyama, T. 1999, ApJ 526, L49  
 Tsuneta, S. et al. 1992, PASJ 44, L63



柴田一成

shibata@kwasan.kyoto-u.ac.jp