

地球上の物質からさぐる巨大太陽プロトン現象の発生頻度

望月 優子, 高橋 和也, 柴田 一成

1 はじめに

太陽フレアとは、太陽表面でしばしば起きている爆発現象である。巨大な太陽フレアに伴って、10メガ電子ボルト (MeV) 程度から 500 MeV を越える高エネルギー陽子が地球の大気に激突する。これを太陽プロトン現象 (solar proton event ; SPE) と呼ぶ。巨大な SPE に引き続いて、磁気嵐が発生する。1989年10月に起きた SPE では、激しい磁気嵐がカナダのケベック州全域の電力システムを破壊し、9時間にわたって停電した。影響は600万人に及び、復興に数か月を要した。また1859年に人類が最初に見た太陽フレア (「キャリントン・フレア」と呼ばれる) は、過去200年間で最大の磁気嵐を起こしたことが知られているが、このクラスの巨大 SPE が現在再び発生すれば、損害は最大160兆円にのぼり、修復には長くて10年を要するとの全米科学アカデミーの試算がでている¹⁾。

人類の脅威となる巨大 SPE はどのような頻度で発生するのだろうか？ 本稿では、地球上の物質、特にグリーンランドの雪氷コアに着目し、コア中の硝酸イオン (NO_3^-) に過去の巨大 SPE の痕跡が残るとする分析的な研究²⁾を解説する。また、アポロ宇宙船が月から持ち帰った岩石中の宇宙線生成核種の分析から過去の巨大 SPE の影響を調べた研究³⁾に言及する。これらの研究から、巨大 SPE の発生確率が議論されている²⁾³⁾。ごく最近、太陽に似た数多くの星の超巨大フレアの研究⁴⁾からも、この結果と矛盾しない発生確率が示唆された。巨大 SPE を理解するための分析的な研究の現状における問題点と、今後の発展を展望する。

2 雪氷コア中の SPE の痕跡

雪氷コアとは、円柱状の氷の試料である。深度と年代とが対応しているため、コアの成分を分析すれば雪が降った当時の大気成分の変動がわかる。いわば過去のタイムカプセルである。雪氷コアは、グリーンランド (図1) や南極大陸で掘削される。グリーンランドは、北極海と北大西洋の間にある世界最大の島であり、その大部分は北極圏に属し、氷床と万年雪に覆われている。ちなみに北極点は北極海にある。

Zeller と Drecchhoff は、1988年から1992年にかけてグリーンランドと南極大陸で長短3本の雪氷コア

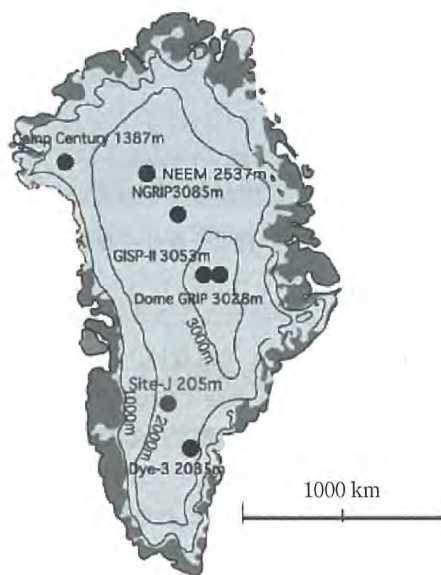
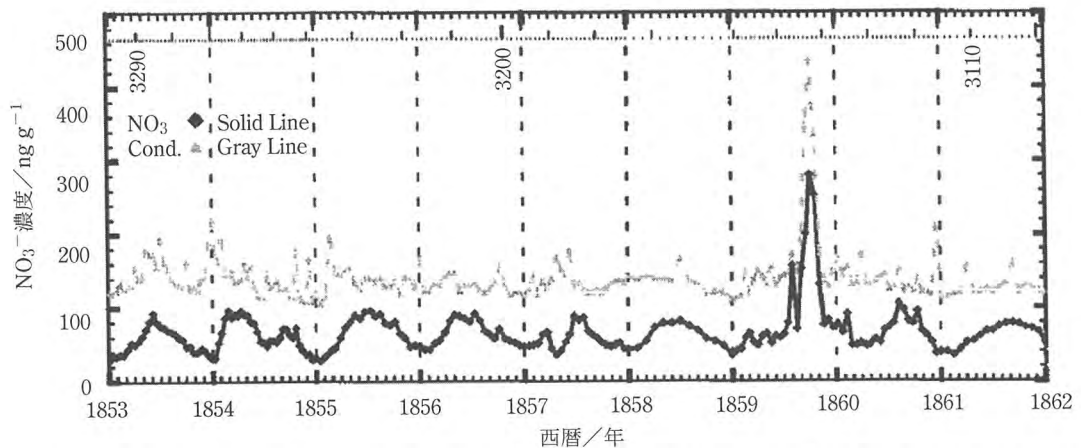


図1 グリーンランドの主な雪氷コアの掘削地 [文献5] 図1-2 より一部転載]

を取得し、それらの NO_3^- 濃度を1か月以下の非常に細かい時間分解能で分析した。このうち長いグリーンランドのコア (125.6 m, 図1のGISP-II地点で掘削) について、1561年から1950年までの約400年間に相当する深度における NO_3^- 濃度変動上に現れたスパイクと、七つの比較的大きな SPE が観測された時期とが同期していると報告した²⁾。

図2にこのグリーンランドコア中の NO_3^- 濃度変動の一例²⁾を示す。年変動をしているベースライン上に突発的にスパイクが立ち上がっている。このスパイクは、1章で述べた1859年9月に起きたキャリントン・フレアに相当すると主張されている。ここでの NO_3^- 濃度の分析は、紫外線領域における吸光分光分析法に依る。一方、最近の雪氷コアのイオン分析では、電気透析型のオートサプレッサーを有するイオンクロマトグラフィー装置により、ppbレベルの高精度なイオン分析が容易になっている。

SPE と同定された NO_3^- スパイクは、その継続時間が特徴的である。スパイクの多くが2週間程度のタイムスケールで増減し、6週間を越えるスパイクはない (図2)。天文衛星による直接観測から、太陽からの高エネルギー陽子の放出は数日間続くことがわかっているの



1859年のスパイクは、キャリントン・フレアに相当するとされる。灰色の三角と点線は電気伝導度。上部にはサンプル番号が示されている。文献 2) Figure 1 より転載。

図 2 グリーンランド雪氷コア中の NO_3^- 濃度変動 (菱形と実線)

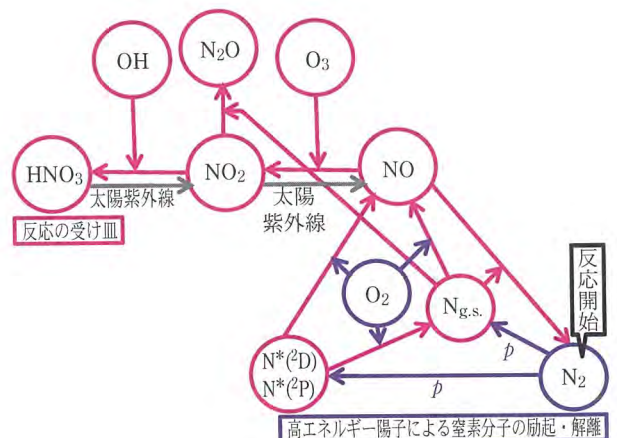
で、この継続時間はおかしくはない。但し、次章で述べるように、SPE によって上空で生じた窒素酸化物がすばやく重力沈降することが必要で、その物理機構はまだ解明されていない。

また、 NO_3^- スパイクと SPE との同定には、正確な年代決定が必要である。McCracken ら²⁾は、コアの電気伝導度の変動 (図 2) から、北極域に影響した既知の過去の火山噴火を同定し、絶対年代を決めた。そして近傍の噴火タイムマーカ間の NO_3^- 濃度変動上に現れた年変動の山を数えて年代を構築した。その不定性は、図 2 のように NO_3^- 濃度の年変動が明瞭に観測され、かつ噴火シグナルが比較的近傍に同定できた場合は、 ± 2 か月で、悪くても ± 1 年とされている。但し、ここで絶対年代マーカそのものにも不定性があることを留意しておくべきである。数百年前であれば火山噴火が起きた正確な年月日まではわからないし、また噴火で生じた硫酸エアロゾルが噴火時からどれだけ遅れてグリーンランドの雪中に堆積したかという不定性もつきまとう。

3 SPE が引き起こす成層圏大気の化学反応

ここで、何故 SPE が雪氷コア中の NO_3^- の増加を引き起こすのかについて、簡単にまとめておこう。

高エネルギー陽子は地球大気に侵入すると、大気中の原子・分子を電離・励起することで徐々に運動エネルギーを減らし、大気と同程度の運動エネルギーまで減速する。一方、高エネルギー陽子によって原子・分子が電離・励起されて大気中に生じたイオンや中性ラジカルは、化学反応を引き起こし、大気組成が変動する。SPE に特徴的な大気圏外で約 20 MeV 以上 (速度にして光速の約 20% 以上) の運動エネルギーを持つ陽子は、成層圏 (高度 10~50 km) まで侵入してくるので、太陽から放たれた陽子によって地球の成層圏大気の化学



高エネルギー陽子 (青色の p) の衝突によって、大気の主成分である窒素分子 (N_2) と酸素分子 (O_2) を材料に、窒素酸化物 (NO , NO_2 , HNO_3) が生成される。筆者作成。

図 3 太陽プロトン現象 (SPE) において、高エネルギー陽子が成層圏大気中で引き起こす放射線過程と化学反応の主要な経路

組成が変わることになる。また、高エネルギー陽子の多くは地球磁場の磁力線のまわりをらせん状に運動しながら落ちてくるため、磁力線の集まる極域の大気に SPE の影響が現れやすい。

太陽高エネルギー陽子が硝酸分子 (HNO_3) の生成をどのように誘起するか簡単に示すため、 HNO_3 へ至る中性の化学種による主要な反応経路のみを図 3 に示した。大気の主成分である非常に安定な窒素分子 (N_2) に高エネルギー陽子が衝突すると、 N_2 を励起・解離させ、励起状態 [$\text{N}^*(2D)$, $\text{N}^*(2P)$] および基底状態 ($\text{N}_{g.s.}$) の窒素原子が生じる。これらの窒素原子は酸素分子 (O_2) と反応して一酸化窒素 (NO) を生成し、二酸化窒素 (NO_2) を経て最終的に HNO_3 へと行き着く。 HNO_3 , NO_2 , NO 氷床中の NO_3^- の前駆体であり、 NO_2

と総称される。実際には、イオンが関与する反応や中性の化学種のみが関与する反応など、100種類を超える反応がNO_y濃度の増加に直接的または間接的に関与している。ここで、高エネルギー陽子によって生成されたイオンの多くは、成層圏では中性化過程（正電荷をもつイオンと、負電荷をもつイオンまたは電子との再結合過程）を経て、かなり速く中性の化学種へと変化し、中性化学種の反応に組み込まれると考えられている。

生成されたNO_yは、主に重力沈降によって地表に達し、極域の氷床中に保存されると考えられる。この重力沈降は、冬季に極域の成層圏で発達する極域成層圏雲(PSC)と呼ばれる雲の形成に伴って効果的に起きることが知られている。PSC中の雲粒子にはNO_y(主にHNO₃)が取り込まれており、この雲粒子自身が対して相対的に沈降することによって、NO_yが成層圏から抜け落ちる(これを脱室と呼ぶ)。PSCの形成されやすさやそのタイプは南極側と北極側とで違いがあり⁶⁾、脱室の詳細な機構はよくわかっていない。興味深い説として太陽高エネルギー陽子が成層圏を通過することによって選択的に粒径の大きなPSC粒子が形成され、その重力沈降により1週間程度のタイムスケールで脱室が進行するという提案⁷⁾がある。

4 陽子フルエンスの見積りとその精度

ある現象が起きている間に、単位面積を通過した粒子の総数をフルエンスと呼ぶ。雪氷コア中のNO₃⁻濃度変動上のスパイクがSPEと同定されると、ベースラインの変動から超過した分のNO₃⁻濃度を見積ることができる。McCrackenらは、雪氷コアの当該シグナル部分の密度をρ(g/cm³)、1個のサンプル長をL(cm)、濃度上昇を起こすn番目のサンプルのNO₃⁻濃度をC_n(ng/g)として、「コンバージョン・ファクターκ」を次の式で定義した²⁾。

$$\rho L \Sigma C_n = \kappa F_9 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、F₉(cm⁻²)は、1×10⁹で規格化した30 MeV超の陽子の全立体角(4π)フルエンスである。κ(ng)は、1個の高エネルギー陽子が結果的に雪氷コア中に生じさせるNO₃⁻の量と解釈できる。κは、季節、掘削地の位置(南極か北極か、同じグリーンランド内でも降雪環境が異なるので場所によっても違いがでるはずである)、さらに太陽高エネルギー陽子のエネルギースペクトルにも依存する。より高いエネルギーの陽子は成層圏のより下部へ侵入し、結果として生成されるNO_yがより沈降しやすくなるためである。

衛星観測から1972年8月と1989年10月の二つの大きなSPEについてF₉が求まっているので、式(1)からグリーンランドコアについてのκを求めることができる。κは元々上述のように不定性が大きい上、たった

2個の濃度不定性が大きいスパイクの結果から導出されている。McCrackenらは、衛星による直接観測のない1561年から1950年までに相当する雪氷コア中に出現した125個のNO₃⁻スパイクがSPEに相当すると解釈し、κ=40を仮定してそれぞれのイベントの陽子フルエンスを求めた。これらはF₉>1の比較的規模の大きなイベントに対応している。このうち、F₉>2の70個が表(文献2)のTable 1)に示されているが、式(1)のρLが考慮されていないという計算間違いがある。但し、コアの深度に依るがざっとρ=0.3-0.8 g/cm³、L=1.5 cmであるため、彼らの表の値が大きく外れるということはない。いずれにしても、導出されたフルエンスの有効数字は1桁ないことに留意が必要である。なお、このMcCrackenらの結果と、1950年代以降に観測機器で直接観測されたSPEのデータを組み合わせて、1859年のキャリントン・フレアが過去450年間で最大のSPEを引き起こしたことが示唆されている²⁾。

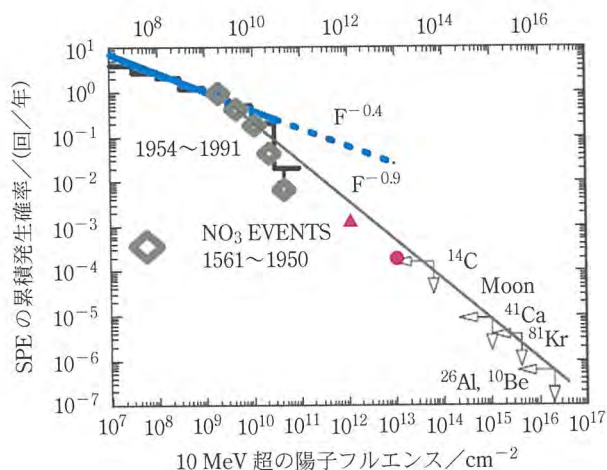
5 巨大SPEの累積発生頻度

あるフルエンスより大きなフルエンスを持つSPEイベント数を、フルエンスの関数として図4に示す。この累積発生確率分布は、4通りの方法で求められている。まず、図中のヒストグラムは、衛星等で直接観測された通常の大きさのSPEの頻度分布であり、フルエンスをFとしてF^{-0.4}のべき乗で頻度が落ちる傾向にある³⁾。図4の右下の¹⁴C等の矢印は、月の表層試料から推測した超巨大SPEのFとその発生確率との関係の上限を示す³⁾。以下では、まず月の岩石の分析について概説し、次に雪氷コアからの結果²⁾、そして太陽以外の天体からの示唆⁴⁾について述べる。

5.1 月の岩石からの考察

月は大気がないため、太陽起源や銀河起源の宇宙線(主に陽子)の影響を直接反映している。月表面の岩石が高エネルギー陽子の照射を受けると、核破碎反応が起き、¹⁰Be(半減期約150万年)、¹⁴C(半減期約5700年)、²⁶Al(半減期約71万年)、³⁶Cl(半減期約30万年)、⁴¹Ca(半減期約10万年)、⁸¹Kr(半減期約23万年)などの長寿命の放射性同位体が生成される。

同位体のそれぞれの生成量は、月の岩石の化学組成と照射量(及び陽子のエネルギー)、岩石の組成に応じたその核種の生成反応断面積、さらにその岩石の宇宙線に対する曝露時間と核種の半減期に依存する。これらの核種は通常、極微量しか含まれていないので、加速器質量分析(AMS)装置を用いて定量を行う。現在、AMSでは、アバundance感度にして10⁻¹⁵以下での極微量分析が可能である。しかし、⁴¹Caや⁸¹Krといった一部の核種は、測定が非常に難しく、同位体の存在が確認できた程度であるので、結果の不定性は1桁以上あると考え



黒いヒストグラムは、衛星等で直接観測された SPE イベントを示す³⁾。灰色の菱形は、1561~1950 年の硝酸イオンスパイクから求められた²⁾。右下の矢印は月の岩石から求められた宇宙線生成核種の上限值で、全フルエンスが 1 発の超巨大 SPE に依ると仮定されている³⁾。赤い三角と丸印は、太陽型星からの類推値 (本文参照)。文献²⁾ Figure 5 の横軸 (30 MeV 超フルエンス) を 10 MeV 超フルエンスに変換し、太陽型星からの類推値を追加した。

図 4 太陽プロトン現象 (SPE) の累積発生確率分布

られる。

岩石に銀河起源の宇宙線陽子が照射する場合は、岩石の深部にまで上述の宇宙線生成核種が生成され、表層部の数 cm のみに限ってこれに太陽高エネルギー陽子による生成が上乗せされる。従って、一つの核種の生成量が岩石の表面からの深さの関数として得られれば、SPE 起源の生成量を銀河宇宙線起源から区別でき、また太陽高エネルギー陽子の平均フラックス (流れに垂直な単位面積を単位時間に通過した粒子の個数) とエネルギースペクトルの形も決定できる。着目する宇宙線生成核種の半減期は長いから、わかるのは雪氷コア中の NO₃⁻ のように個々の SPE イベントに分割されたものではなく、半減期程度の期間に累積した SPE の影響である。

図 4 で示された矢印は、分析されたこれらの SPE 起源の宇宙線生成核種の生成量を、当該の核種の半減期に相当する昔に一発だけ起きた超巨大 SPE で説明するという、極端な仮定の下に求められた上限である。著者の Reedy が指摘しているように、分析された放射性核種の量は、一発の超巨大イベントを必要としなくとも、現代の通常クラスの SPE の頻度分布で説明可能である³⁾。Reedy は、この極端な仮定から、 F が約 10^{10} cm^{-2} 以上の巨大 SPE の発生確率は、上限でも $F^{-0.9}$ で減衰し、通常クラスの SPE の発生確率分布 ($F^{-0.4}$) の減衰傾向とは明らかに異なることを初めて指摘した (図 4)。

5.2 雪氷コアからの考察

図 4 には、4 章で得られた雪氷コア中の NO₃⁻ スパイクから求められた 125 個の SPE の累積発生頻度が菱形

でプロットしてある。McCracken らは、この結果から図の $F=10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 付近から頻度分布が急激に減衰すると指摘した²⁾。これは、Reedy が示したべき -0.9 の上限ラインより傾きが急であることが見てとれる。

以上は 2001 年時点での発表だが、同じグループが、2004 年にグリーンランドで掘削された 30 m の雪氷コアについて、連続流れ解析 (continuous flow analyses) による手法で NO₃⁻ を分析している⁸⁾。但し、新たなコアでは 1940~1950 年の 10 年間について今までの主張を追認したにすぎず、図 4 の累積発生頻度は、現時点で本質的に変わっていない。また、最近、他の独立したグループによって、他の複数の雪氷コアに対して連続流れ解析による分析が行われているが、SPE との関連で発表されているものはいまだない。これは、雪氷コア中で NO₃⁻ 濃度が変動する理由が雪氷学的にいまだよく理解されていないことにも原因がありそうである。

5.3 太陽型星からの考察

天文学的には、太陽では超巨大 SPE は起きないと長らく考えられてきたが、ごく最近、筆者の一人 (柴田) が率いる京都大グループによって、この定説が覆された。太陽ではまだ超巨大フレアは直接観測されていないが、数多くの太陽に似た星 (太陽型星) で、超巨大フレアが起こっていることがわかったのである⁴⁾。この研究から、冒頭に述べた 1989 年の巨大太陽フレア (10^{32} エルグ) の 10 MeV 超の陽子フルエンスを 10^{10} cm^{-2} と仮定すると、 10^{35} エルグの超巨大フレアは 5000 年に 1 回、 10^{34} エルグのフレアは 800 年に 1 回くらいの確率で起きると推定される。これらは図 4 に示されているように、 $F^{-0.9}$ の上限ラインの比較的近傍にくる。但し、現段階では、1 桁程度の不確実性が見込まれる。また、ごく最近、屋久杉の年輪試料中の放射性炭素の AMS 分析から、西暦 774 年から 775 年にかけて宇宙線の大変動が起きていたことがわかり、その原因の一つとして太陽で超巨大 SPE が起きた可能性が指摘されている⁹⁾ ことは、特筆に値する。

6 まとめと展望

巨大地震と同じく、巨大 SPE はいずれ起きるだろう。しかし現状では、我々は巨大 SPE をよく理解しているとは言い難い。今後、雪氷コアや月の岩石などの分析的研究をさらに進め、巨大 SPE が発生する頻度について理解を深めることは非常に重要である。過去を知ることによって、将来の巨大 SPE の予測とそれからの防備に大きく貢献できるからである。

雪氷コアから SPE を同定する研究は、まだ広く受け入れられているとは言い難い。まず衛星での観測記録のある 1970 年代以降について詳しい解析が待たれる。また、理論面での研究もあわせて必要であろう。

雪氷コア中の NO_3^- を構成する窒素ならびに酸素の安定同位体比を調べるにより、スパイクの起源にさらに迫ることができると期待され、理化学研究所でその分析準備が始まっている。

謝辞 中井陽一氏（理化学研究所）より、放射線過程と化学反応について多くのご教示を頂きました。ここに感謝致します。

文 献

- 1) National Research Council : "Severe space weather events - Understanding societal and economic impacts : workshop report", (2008) (<http://www.nap.edu/catalog/12507.html>).
- 2) K. G. McCracken, G. A. M. Dreschhoff, E. J. Zeller, D. F. Smart, M. A. Shea : *J. Geophys. Res.*, **106**, 21585 (2001).
- 3) R. C. Reedy : "Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances", K. S. Balasubramaniam, et al. (eds), p. 429 (1996), (ASP Conference Series, 95).
- 4) H. Maehara, T. Shibayama, S. Notsu, Y. Notsu, T. Nagano, S. Kusaba, S. Honda, D. Nogami, K. Shibata : *Nature*, **485**, 478 (2012).
- 5) 藤井理行, 本山秀明編著 : "アイスコア 地球環境のタイムカプセル", p. 4 (2011), (成山堂書店).
- 6) 白石浩一 : *Eurozoru Kenkyu* 25, 219 (2010).
- 7) F. Yu : *Atmospheric Chem. Phys.*, **4**, 2273 (2004).
- 8) L. Kepko, H. Spence, D. F. Smart, M. A. Shea : *J. Atmospheric Solar-Terrestrial Phys.*, **71**, 1840 (2009).
- 9) F. Miyake, K. Nagaya, K. Masuda, T. Nakamura : *Nature*,



望月優子 (Yuko MOTIZUKI)

独立行政法人理化学研究所 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)。博士 (理学) (東京大学)。《現在の研究テーマ》雪氷コアを用いた過去の天体現象と気候変動の研究, 宇宙核物理学。《主な著書》“人類の住む宇宙 (シリーズ現代の天文学 第1巻)” (共著) (日本評論社)。《趣味》読書。
E-mail : motizuki@riken.jp



高橋和也 (Kazuya TAKAHASHI)

独立行政法人理化学研究所 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。理学博士。《現在の研究テーマ》ECR イオン源を用いた質量分析装置の開発及び同位体測定に基づいた地球科学的研究。《趣味》模型製作。
E-mail : kazuyat@riken.jp



柴田一成 (Kazunari SHIBATA)

京都大学大学院理学研究科附属天文台 (〒607-8471 京都市山科区北花山高峰町 京大花山天文台)。京都大学理学博士。《現在の研究テーマ》太陽・宇宙の爆発現象のプラズマ物理・電磁流体力学, 宇宙天文学。《主な著書》“太陽の科学” (NHK 出版)。《趣味》地図を見ること, 天体映像・写真の観賞。
E-mail : shibata@kwasan.kyoto-u.ac.jp