

左：次期 X 線天文衛星 ASTRO-H の固定式光学ベンチ (FOB) 単体振動試験の様子  
 右：衛星全体の想像イラスト。FOB は金色の熱制御フィルムに覆われている。

## 宇宙科学最前線

# X 線で探る超新星残骸

理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室  
 基礎科学特別研究員

勝田 哲

### 超新星と超新星残骸 (SNR)

夜空に突如明るく輝き出す「超新星」。あたかも新たな星が出現したように見えるためその名が付いたのですが、実際には星の終焉を飾る大爆発です。爆発エネルギーはすさまじく、最大光度は銀河1個分にも匹敵します。長い歴史の中では、地球近傍で起こった故に昼でも見えるほど明るくなった例もあります。歴史書には2世紀から17世紀の間に7例の記録が残っていますが、その中で最も明るかったものは西暦1006年の超新星と考えられており、その光度は満月の4分の1にも達したそうです。世界各地でその観察記録が残っており、日本では藤原定家が、伝聞をもとに『明月記』に記述しています。

超新星は出現後1年もすれば、ピーク時の1000

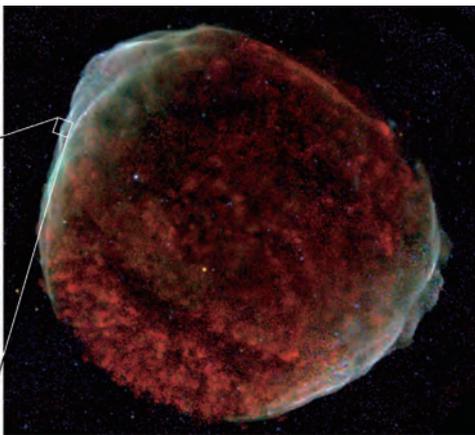
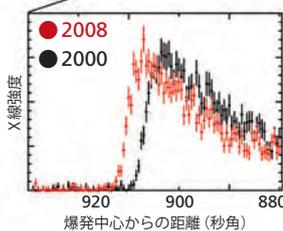
分の1以下にまで暗くなり、肉眼では見えなくなります。その一方で、爆発に伴う爆風は、10000km/s (1秒間に地球を4分の1周する)ほどのすさまじいスピードで周囲の星間ガスをのみ込みながら広がっていきます。その結果、宇宙空間に極高温プラズマ雲(プラズマとは原子が電子とイオンに分かれた状態)が形成されます。これが「超新星残骸 (SNR)」と呼ばれる天体です。肉眼では見えませんが、近年の観測機器の発達により、銀河系内だけでも300個近く見つっています。

### X 線で SNR を観測する

SNR プラズマの典型的な温度は百万～数千万度です。これほど高温になると、可視光帯域の放射は微弱ですが、X 線帯域 (可視光の1000分の1の波長

図1 超新星残骸 SN1006

右:「Chandra」で撮像された超新星残骸 SN1006。赤は熱的放射, 青はシンクロトロン放射に対応する。左: 北東領域の衝撃波の断面図。2000~08年の間に衝撃波が進んだ様子が分かる。



の光で明るく輝きます。そのためSNRは可視光ではあまり目立たない天体ですが、灼熱のX線宇宙においては大きな存在感を示しています。

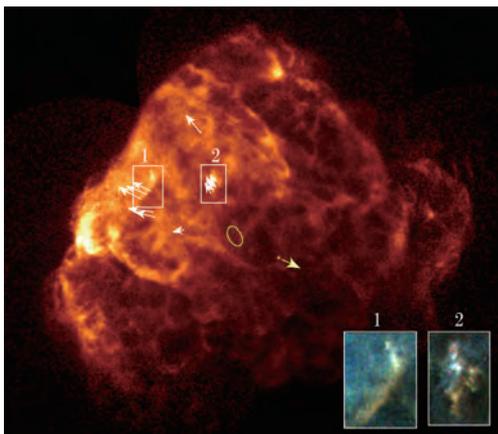
X線は大気を透過しないため、天体からのX線を観測するには、人工衛星や気球などを利用します。現在軌道にあるX線天文衛星は、米国の「Chandra」、欧州の「XMM-Newton」、日本の「すざく」の3機で、いずれも焦点面検出器として非分散系のX線CCDを使用しているため撮像分光が可能。この観測システムは日本が1993年に打ち上げたX線天文衛星「あすか」以降標準的に利用されており、撮像分光を武器にSNRの観測的研究を急速に進展させています。本稿では、その一部をご紹介します。

### SNRの運動学： 爆風が広がる様子を直接捉える

超新星爆発に伴う爆風はすさまじいスピードで周囲に広がりますが、その様子を直接捉えるのは難しいことです。というのも、距離が遠いため（最も近くのSNRでも1000光年ほど離れている）、地球から見るとその運動は1年当たりせいぜい1秒角にしかならないからです。そこで、膨張率の測定は、これまで角度分解能の優れた可視光や電波領域のみで行われてきました。しかし、一般に可視光や電波ではSNRのごく一部の領域しか見えないといった欠点もあり、

図2 超新星残骸バビスAのX線画像

全体像は「ROSAT」による。番号1、2と示した明るいX線構造が爆発噴出物（エジェクタ）起源と判明した。それらの構造の「Chandra」によるカラー画像を右下に示している。エジェクタ2はドップラーシフトの測定により、2000km/sでこちらに向かって飛んでいることが明らかになった。白・黄矢印は、それぞれ可視光で発見されたエジェクタとX線で測定された中性子星の固有運動ベクトル（1000年の期待値）。黄橋円領域は固有運動ベクトルから推定された爆発中心。エジェクタと中性子星が反跳していることが分かる。



SNRの隅々から強く放射されるX線での測定が待ち望まれていました。過去にはドイツの「ROSAT」と米国の「Einstein」による測定はありましたが、両衛星の空間分解能（5秒角）を考えれば、それは極めてチャレンジングな試みだったと言わざるを得ません。

この状況のもと、空間分解能0.5秒角を誇る「Chandra」と、それには劣るものの10秒角程度と優れた視力を持つ「XMM-Newton」が1999年に、それぞれ米国と欧州によって打ち上げられました。これらの衛星が打ち上げられて10年以上たった今、打ち上げ初期に撮られた画像とその後の画像の比較から、SNRが膨張する様子を精密に測定することが可能になってきました。私たち（筆者を中心とする大阪大学、宮崎大学、NASA Goddard Space Flight Centerなどの研究グループ）は、世界に先駆けて近傍のSNRの膨張率を測定することに成功しました。

初めに手掛けたのはペラジュニアSNRでした。このSNRは1998年に「ROSAT」によって発見され、それと同時にガンマ線天文衛星「コンプトン」による観測で<sup>44</sup>Ti（チタン44）の崩壊に伴うガンマ線（半減期60年）の検出が報告されました。SNRからのガンマ線の検出はカシオペアAに続いて2例目であり、多くの研究者から高い関心を集めました。観測されたガンマ線強度から<sup>44</sup>Ti量が見積もられ、元素合成モデルから予測される爆発時の量と比較することによって、SNRの年齢が680年と推定されました。ところが、このSNRに付随すると考えられる中性子星の年齢は数千年と見積もられ、その矛盾が疑問として残されていました。私たちは、「XMM-Newton」によるペラジュニアの北西端の4回（2001、2003、2005、2007年）の画像データを解析することにより、その膨張率が $0.84 \pm 0.23$ 秒角/年であることを明らかにしました。さらに、SNRの膨張率が年齢とともに低下する関係を利用して、その年齢が1700~4300年であると推定しました。この年齢とすると、<sup>44</sup>Tiの爆発時の生成量が桁違いに大きくなり非現実的であることから、ガンマ線の検出が見誤りであったという重要な結論を導くことができました。実際、ガンマ線データの再解析では有意な検出が認められていません。

歴史上の有名人が観察したSNRについても、「Chandra」の画像データから精密に膨張率を導出することに成功しました。藤原定家の記したSN1006（図1）北東領域では、膨張速度を5000km/sと測定するとともに、周辺部のガス密度が $0.085 \text{ cm}^{-3}$ と低いことを初めて見いだしました。このSNRからは最近TeVガンマ線（TeV：テラ電子ボルト、テラは $10^{12}$ ）も検出されていますが、私たちが測定した衝撃波速度や密度は、TeVガンマ線の起源を探る上で重要な手掛かりになると期待されます。また、ティコのSNR（SN1572）とケプラーのSNR（SN1604）でも、

X線の膨張率の測定に成功し、ほかの波長との観測値に矛盾のないことを明らかにしました。

このように、SNR膨張率の測定からは、運動のほかにもさまざまな情報を引き出すことができます。「Chandra」と「XMM-Newton」がSNRのX線観測研究に新しい扉を開いたといえます。SNRのX線による膨張測定はまだ始まったばかりです。今後数年のうちに次々と面白い結果が得られるものと期待しています。

## 飛散する爆発噴出物から探る爆発の様子

天文学上の大問題の一つに、超新星爆発のメカニズムがあります。爆発原理の大枠は確立されているのですが、精密な爆発シミュレーションが成功しないのです。40年以上前からたくさんの研究者が観測と理論両面からこの問題に挑戦し続けていますが、いまだに解けない難問です。観測的には超新星に着目するのが一般的ですが、私たちはSNRに着目しました。SNR中の爆発噴出物（エジェクタ）の分布が爆発時に飛散したエジェクタの分布を反映するとの仮定を置き、爆発の様子を調べようと考えたのです。SNR観測のメリットは、エジェクタが大きく広がっているためその分布を詳細に測定できる点です。

X線輝度が全天でベスト3のSNR、パピスA、はくちょう座ループ、ベラを「XMM-Newton」「すざく」「Chandra」で観測しました。これらのSNRはX線望遠鏡の視野より大きいので、その全体を観測するためには複数回のポインティング観測が必要です。そのため観測データは膨大な量になりますが、丁寧に場所ごとの分光解析を行いました。

その結果、パピスAでは、エジェクタが北東部分に偏って分布することが判明しました（図2）。さらに、あるエジェクタ構造については、輝線がドップラシフトしており、2000km/s程度のスピードでこちらに向かって飛んでいることも判明しました。エジェクタの強い証拠です。一方、このSNRでは中心付近に中性子星も発見されています。興味深いことに、「Chandra」の観測からその運動方向がエジェクタの偏りと反対方向であることが判明しており、エジェクタと中性子星が爆発時に反跳したことを示しています。私たちは、この反跳現象は爆発メカニズムを解く重要なヒントではないかと考え、さらに観測的研究を進めています。はくちょう座ループについても、エジェクタの分布に偏りがあることを見いだしていますが、中性子星はまだ見つかっておらず、その発見が待たれています。

ベラでは、周辺に散在する広がったX線構造を詳細に解析しました。その形状から超新星爆発時に弾丸のように飛び散った星の破片と推測されていたの

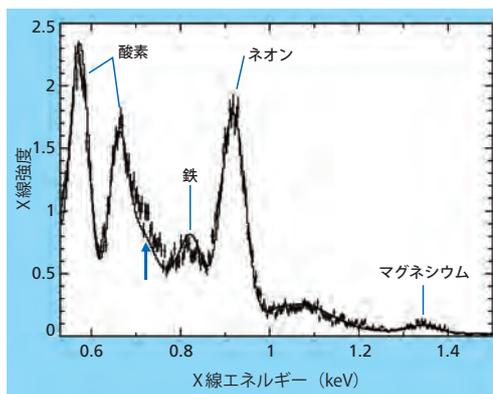


図3 はくちょう座ループ外縁部から抽出した「すざく」のスペクトル

十字はデータ、線は熱的放射モデルを示している。おおむね熱放射モデルで再現されるが、0.7keV付近（矢印）にモデルからの超過成分が見られる。

ですが、分光解析によってその証拠を明らかにしました。では、どのようにして恒星内部でそのようなガス塊ができたのか？超新星爆発時に起こる流体力学的不安定性に起因すると考える理論研究者もおり、もしかすると超新星爆発のメカニズムと密接に関係しているのかもしれない。

## 電荷交換反応由来のX線の検出

SNRからのX線放射過程は、熱的な制動放射と非熱的なシンクロトロン放射の2種類のみと長年信じられてきました。しかし、それらに加え、電荷交換反応由来のX線も無視できないことが、最近の「すざく」の観測から明らかになりました。

私たちは、はくちょう座ループ外縁を「すざく」によって全域にわたって28回の分光・撮像観測を行い、X線構造とスペクトルを導出しました。その中で、衝撃波直後の領域に熱放射では説明のつかない輝線構造を見いだしました（図3）。さまざまな観点からその起源を検討した結果、水素様酸素と中性水素電荷交換反応に伴う放射らしいことが分かりました。電荷交換反応X線自体は、地上実験や彗星などでよく見られる放射ですが、SNRから検出されたことはありません。それ故、SNR研究の新展開を予感させる興味深い結果です。今後、この放射の確証を得るための追観測や、科学的意義について考察を行う必要があります。

## 結び

本稿では、X線天文衛星「Chandra」「XMM-Newton」「すざく」を用いたSNRのX線観測成果の一部をご紹介します。このほかにも興味深い結果が数多くあり、SNRの観測的研究は力強く進展しています。日本の次期X線天文衛星「ASTRO-H」搭載のマイクロカロリメータは、X線CCDに比べ分光能力が20倍ほど優れた非分散分光器です。これによってSNR研究が躍進することは疑う余地がなく、非常に楽しみです。素晴らしい観測装置の設計・開発にご尽力されているすべての皆さまに深く感謝致します。（かつだ・さとる）

## ASTRO-H搭載固定式光学ベンチの振動試験

「はくちょう」「てんま」「ぎんが」「あすか」「すざく」に続く我が国6番目のX線天文衛星ASTRO-H(2014年打上げ予定)には、焦点距離5.6mの軟X線望遠鏡が2台、焦点距離12mの硬X線望遠鏡が2台搭載されます。これら4台の望遠鏡を支えるのが固定式光学ベンチ(FOB)です。表紙写真は、そのFOBの全景です。

FOBの構造は、望遠鏡が搭載される最上段のトップパネルを含む3枚のパネルを、縦方向に伸びる複数のトラスで支える形になります。望遠鏡は精密な光学機器なので、軌道上での温度変化に伴うFOBの変形を極度に嫌います。そのためFOBは大部分が炭素繊維強化プラスチック(CFRP)で製造されています(パネルとトラスはそれぞれ青色と緑色に見えますが、これらは地上での汚染を避けるための保護シートです)。各段のパネルは厚さ70mm、軽量でも強度を稼ぐことのできるアルミハニカムのコアを上下からCFRP板で挟んだ形となっています。トラスを接合する部分にはアルミニウムが使われています。アルミニウムは正の熱膨張係数を持ちますが、CFRPの炭素繊維の配向を工夫

し、トラスに負の熱膨張係数を持たせることにより、FOB全体として熱膨張係数がアルミニウムの100分の1以下となるように設計されています。各パネル間の距離は約2mなので、FOBの全長は約6mになりますが、各段のパネルの位置精度は0.5mm以下に抑えられています。

FOBは昨年12月20日に相模原キャンパスC棟の機械環境試験室に持ち込まれ、単体振動試験に供されました。写真は、横方向の振動試験に向けて振動試験器にセットされた状態のものです。振動試験器と比べると、その大きさを実感していただけだと思います。重量が大きい(340kg)のもさることながら、重心位置が高く、振動試験器の加振能力ぎりぎりであったため、試験は2月後半までかけて慎重に進められました。想定外のトラブルはあったものの、関係者の努力もあり、すべての試験項目を通過することができました。この原稿を書いている3月後半には熱変形試験を実施しています。この後、衛星システム試験のため4月12日に相模原をたち、4月13日に筑波の総合環境試験棟に搬入されることになっています。(石田 學)

## 赤道上での成層圏大気のサンプリング

赤道上空の成層圏大気微量成分を観測するため、小型大気サンプリング装置を搭載した大気球を「白鳳丸」(独立行政法人海洋研究開発機構が運行する学術研究船)から計4機放球し、すべて回収することができました。

対流圏大気は赤道上空で成層圏に入って両極に向かって輸送されるため、赤道上空は長年国内外の中緯度や極域で成層圏大気を研究してきた我々成層圏大気サンプリンググループ(代表者:東北大学大気海洋変動観測研究センター 青木周司教授)の極めたい最後の領域でもありました。このプロジェクトは、東京大学大気海洋研究所の植松光夫教授が立案された研究航海に向け、私たち成層圏大気サンプリンググループに共同研究が持ちかけられたのが始まりでした。過去に船上からの大気球放球の例がなかったわけではありませんが、狭い甲板上でどのような放球法を採用するかが一番の課題で、気球グループに検討を依頼し、最適な方法を北海道大樹町の大樹航空宇宙実験場で事前に練習して放球技術を習得しました。しかし、回収可能な範囲にどの程度の確率で観測器を下ろせるのかなど、事前準備段階では必ずしも確認できていない問題を抱え



「白鳳丸」から放球された気球。2012年2月8日午前9時31分30秒(現地時間)。

たままの出発でした。

我々メンバー3人はほかの研究者と共に1月27日、ペルーのリマ郊外のカヤオ港で「白鳳丸」に乗り込み、29日午後出航して一路赤道に向かいました。意外にも赤道上は天気も良く海は非常に穏やかで、また操船によって甲板上の風向風速を放球に都合が良いように制御できるため、気球実験には適していることがわかりました。2月2日には小型のゾンデを上げ、航跡予測精度が非常に高いことを確認しました。続いて4日には、B2気球を使って特に問題なく放球作業ができました。同機は高度19km付近での大気サンプリングを行い、無事回収できたことに力を得て、5日にB5、7日にB5、8日にB2各1機を放球し、設定した高度での成層圏大気のサン

プリングと観測器の回収も、すべて成功しました。現在国内の関連研究機関では予備的な微量成分分析が行われており、大気試料の量と質に関して問題ないことが確認できました。

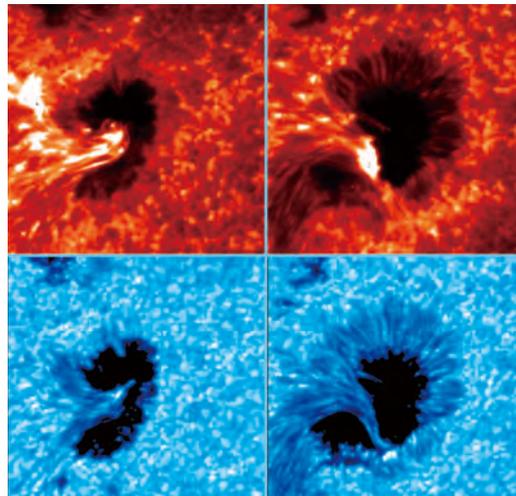
放球や回収作業に協力していただいた「白鳳丸」乗船の船員、研究者、学生の皆さん、また関係機関の方々にお礼申し上げます。(本田秀之)

## 「ひので」が太陽黒点半暗部形成の前駆構造を初めて捉えた

太陽を宇宙空間から観測して初めて実現できる観測の一つが、何十時間以上にわたる連続観測です。太陽観測衛星「ひので」は、連続観測によって、太陽黒点が誕生から大きな黒点に成長する様子を捉えることに成功しました。

これまで、半暗部のない小黒点(ポア)から半暗部を持つ黒点に成長する過程は、よく分かっていませんでした。「ひので」による観測の結果、小黒点の誕生直後に、それを取り巻く半暗部に相当する構造(前駆構造)が、小黒点のある光球ではなくその上空の彩層です

で形成されていることを発見しました。太陽光球内部から浮き上がってくる磁力線が形づくると考えられている黒点の成長において、磁力線が上空の彩層から下がってくることによって黒点の構造の一部が形づくられるとは、



小黒点から黒点への成長。Ca IIのH線で見た彩層(上)と可視Gバンドで見た光球(下)。

専門家も予想していませんでした。黒点は太陽面にはり付いた構造と考えられます。そして密度の高い光球でまず構造がつくられ、その結果として上空の彩層構造がつくられる、というのが自然な考え方です。今回の発見は、これを覆し、黒点の形成過程は彩層も含む立体的な磁場構造の成長過程として捉えなければならないことを明らかにしました。

この数年、数値シミュレーションによって計算機内で黒点の形成や構造を再現する研究が急速に進んでいます。しかし、半暗部の

形成は、数値シミュレーションでもまだ再現できていません。また、半暗部の前駆構造の可視化は、フレア爆発などを引き起こす活動領域の発達を予測するのに役立つ可能性も示唆しています。(清水敏文)

## 高頻度再使用ロケット実験機・第2次地上燃焼試験

将来、宇宙に物や人を大量に運ぶために宇宙輸送機を航空機のように頻繁に繰り返して飛ばすには、どのような技術が必要となるか。それを研究テーマとして、「再使用高頻度宇宙輸送システムの研究」を進めています。技術課題の抽出と運用経験の蓄積を目的とし、実際にロケットをシステムレベルで繰り返し地上運用する「高頻度再使用ロケット実験機・第2次地上燃焼試験」を能代ロケット実験場で3月に行いました。例年だと3月の後半にもなると日本海に面した能代も春の気配が漂い、防寒着なしで屋外作業を行うことができることもあるのですが、今年は最後の撤収日まで強風の中で雪が舞うような真冬の雰囲気での実験でした。

昨年、高頻度再使用ロケット実験機として初めての地上燃焼試験を行ったのですが、地上運用を効率的かつ安全に行うべく新しく取り入れたコンピュータによる自動運用(液体水素/液体酸素の充填など)にことごとく難航し、「高頻度」というにはまだまだという結果でした。昨年の教訓から自動運用のフローを見直



地上燃焼試験FRV-2

し、エンジン予冷など新たな自動化も追加して1年ぶりに地上燃焼試験を実施しました。目標は昨年の半分以下の時間で運用することでしたが、運用の一部を自動化するだけでは複雑な操作の簡略化にはなっても大幅な時間短縮にはなかなかつながらず、バルブの動作確認や高圧ガス供給系の圧力設定などのやり方を大きく変えなければなりません。

また今回の実験では運用の効率化だけでなく、エンジンの異常を検知するための必要なヘルスマネジメント機能のための燃焼データの取得や、高性能化のための複合材ノズルの試験なども併せて行い、重要

なデータが得られたとともに新たな課題も明らかになりました。

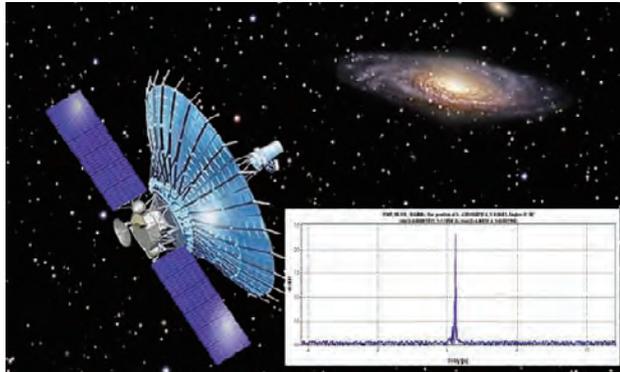
ロケットが宇宙から戻ってきてスペースポートに着陸し、簡単な点検整備の後、燃料を入れて2時間後にまた宇宙に向けて飛び立つ。そんなロケットをつくるにはどうしたらよいか。今回の実験で明らかになった新たな課題に取り組み、次へとつなげていきます。(野中聡)

## 「ラジオアストロン」スペースVLBIと臼田64m望遠鏡

2011年7月18日、バイコヌールからロシアの電波天文衛星「spektr-R」が打ち上げられました。この衛星は近地点およそ2万km、遠地点30万km以上の長楕円軌道に乗り、周波数0.3, 1.6, 4.8, 22GHzで天体からの電波を観測します。「spektr-R」の目的は、宇宙と地球の電波望遠鏡を結んだス

ペースVLBIを行い、世界最高の解像度で天体を観測することです。このロシアのミッションは「ラジオアストロン」と呼ばれています。

1997年に打ち上げられた「はるか」、打ち上げに至らずに先日ミッション終了を迎えたASTRO-GもスペースVLBIミッションです。これらの計画と今回のロシアの計画との間の大きな違いは軌道高度にあります。VLBIはアンテナ間の距離を延ばすほど解像度が高くなります。日本の計画は遠地点高度2万～2万5000kmで達成できるアンテナ間距離は地球直径の3倍程度ですが、衛星の軌道周期を短くして天体画像の質を高めるようにしました。一方、「spektr-R」の遠地点高度はその10倍以上で、とことん解像度を上げることにこだわっています。ただし、ある特定の方向しかその性能は出せません。しかし、一方向とはいえ22GHzにおいて7マイクロ秒角という解像度（月面に置かれた1cmの石を地球から見分けられる角度分解能）で天体の情報を得ることができます。これによって活動銀河中



ラジオアストロンの電波天文衛星と臼田望遠鏡の間で検出した天体の干渉信号(中央部のピークの部分)

心核などを観測し、その表面輝度を調べます。

衛星に搭載された直径10mのパラボラアンテナが宇宙で展開して電波望遠鏡の性能確認が行われ、11月から世界の望遠鏡と共にスペースVLBIの試験観測を開始しました。日本からは臼田64m望遠鏡がラジオアストロンに参加しています。臼

田望遠鏡にとっては「はるか」との観測以来久々のスペースVLBIですが、試験観測で見事に衛星との間で天体の干渉信号を得て、ラジオアストロン観測を成功させました。3月までにすべての周波数で天体の干渉信号を検出し、VLBI観測性能が完全に確認されました。また、今年1月から試験観測と並行して初期科学観測もスタートし、地球直径の10倍を超えるアンテナ間距離で天体の干渉信号を検出しています。

臼田望遠鏡は世界的に見て非常に強力な大型電波望遠鏡です。ラジオアストロンを推進するロシアのアストロ・スペース・センターは、臼田の貢献に大きな期待を抱いています。今後は宇宙研からも臼田望遠鏡が参加する初期観測提案を行い、高輝度天体の科学観測にも乗り込みます。最後になりましたが、このロシア-日本のスペースVLBIにご協力いただいている皆さま、応援していただいている皆さまに心より感謝致します。

(朝木義晴)

## SMILES 観測データの一般向け公開を開始

国際宇宙ステーション (ISS) に搭載され、2009年秋から2010年春まで地球大気の観測を行った超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES) について、宇宙研では観測停止後もデータ解析を継続してきました。これまで協力研究者に限って試験的なデータを提供してきましたが、最新版のデータが大気科学研究に使うに耐える精度を持つことが確認できたとして、2012年3月5日より観測データを広く公開しています。

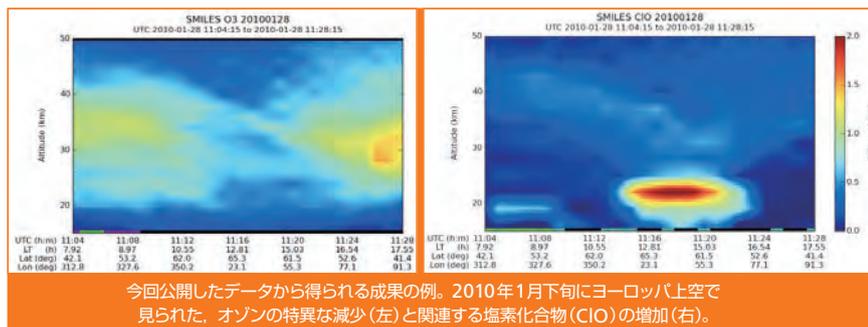
SMILESの観測データは、観測開始後2年以上にわたり改良を繰り返す、試験データの提供も5回に上ります。こ

れまではSMILES観測データの妥当性を確認する方法として、従来の人工衛星からの大気観測データと比較していましたが、最近では数値シミュレーションモデルとの比較を重視しています。モデルとはいえ、これまで得られた大気中の化学反応の知見をすべて取り入れ、大型計算機を使って膨大な計算を行うため、近年のモデル計算は「下手な観測よりも正確」といっていいくらい精度の高いものです。幸い、SMILESのデータは最新のモデル計算と数%の誤差で一致しており、上述の衛星観測データとの比較などより似通った結果を出しています。絶対の確信はまだ持て

ませんが、これらの結果から、SMILESの観測は従来の大気化学の理解を覆す可能性も秘めていると思われます。

今回公開したデータを使い、宇宙研の研究チームでもいく

つかの研究論文を執筆しています。例えば、オゾンホール問題に代表される成層圏のオゾンの化学的な破壊に密接な関係を持つ、フロンガスなどが分解されて発生する塩素化合物について、これまでの観測やモデル予測による結果に一石を投じることを目指します。



SMILES データ公開サイト

<http://smiles.isas.jaxa.jp/access/indexe.shtml>

データのダウンロードはユーザー登録制となっています。上記URLの申し込みフォームから登録情報を送信してください。(佐野琢己)

## SPICA 遠赤外線観測装置 (SAFARI) コンソーシアム会議開催 ～オランダ SPICA 予算が認められる～

次世代赤外線衛星 SPICA に搭載される遠赤外線観測装置 (SAFARI: SPICA Far-InfraRed Instrument) の開発は、欧州を中心とする国際コンソーシアムが担当します。このコンソーシアム会議が3月13日から15日にかけて、オランダ・フローニンゲンにおいて開催されました。この



SAFARI コンソーシアム会議の出席者

の会議の直前に、コンソーシアムの中心であるオランダが SAFARI 開発のために1800万ユーロ (約20億円) の外部資金を獲得したとのビッグニュースがあり、コンソーシアム会議は、大いに活気づきました。地元でもこのことは大きな注目を集め、TVや新聞記事でも取り上げられました。

SPICA 計画は、JAXA 主導の国際協力で行っている次世代の赤外線天文衛星計画です。口径3.2mの大型望遠鏡を宇宙に打ち上げ、マイナス267℃という極低温にまで冷却することにより、今までにない圧倒的な高感度観測を赤外線領域で可能にします。これにより、「銀河誕生のドラマ」から「惑星系のレシピ」に至るまで、現代天文学の重要課題の解明に挑みます。

SPICA 搭載装置のうち SAFARI 開発は国際コンソーシアムが担当しますが、その中心となっているのが、オランダ宇宙研究機関 (SRON: Space Research Organization of Netherlands) です。SRON は、今回獲得した外部資金に内部資金を合わせると、オランダの SAFARI 担当部分の90%に当たる予算を獲得したことになりました。これは、SPICA 実現に向けての大きな一歩となります。

コンソーシアム会議には、写真でも分かるように、欧州を中心として世界各国から多くの研究者・エンジニアが参加しました。科学目的の最適化、および開発進捗の確認の両面から、活発な議論が繰り広げられました。

(中川貴雄)

## お知らせ

**5月21日の朝、金環日食が見られます。**

内之浦宇宙空間観測所やJAXA相模原キャンパスを含む九州から関東地方にかけての帯状の範囲で、金環日食となります。当日の様子は、JAXA相模原チャンネルで中継する予定です。

詳しくは、宇宙研のホームページをご覧ください。▶▶▶ <http://www.isas.jaxa.jp/>

## 第2回「月と火星の縦孔・溶岩チューブ探査研究会」@富士河口湖町

月周回衛星「かぐや」(SELENE)に搭載された地形カメラで、月の溶岩チューブにつながるとされる縦孔が発見されました。火星にも似た孔が見つっています。溶岩チューブや縦孔については多くの科学研究課題があります。また隕石などから守られる地下の溶岩チューブは月や火星の基地建設地候補です。(『ISASニュース』2010年2月号, No.347参照。http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2010/haruyama/index.shtml)。

将来、月や火星の縦孔・溶岩チューブ探査をしたい、ということで、2010年度に第1回の研究会を開催したところ、延べ80人以上もの方々が参加され、科学・探査技術・アウトリーチにアイデアを持っておられる方がたくさんいることが分かりました。

2回目となる今回は、火山学者の白尾元理さんの助言もあり、多くの溶岩チューブがある富士河口湖町での開催となりました。また同町の厚意で、調査を兼ねて溶岩チューブの一つである西湖コウモリ穴に入りました。ヘルメットをかぶって入った穴の中



西湖コウモリ穴にて

で、地質・火山・生命科学研究者がどう科学をするのか、したいのかを語り、具体的に探査するにはどうしたらよいか、何が課題かを工学研究者が熱く議論しました。世界に誇る溶岩チューブを持つ日本は、月や火星の縦孔・溶岩チューブ探査を目指すべきです。研究会は、参加者が2日で延べ70人を超え、野外調査経験によって深まった討論を踏まえ、今後さらに研究を共に深め、ま

た探査実現を目指すことを誓い合って終了致しました。

今回、宇宙研より研究会開催支援費をいただきましたが、所外開催もあって共同利用の三好さん、谷亀さん、契約の田口さん、総務の永井さん、秘書の三澤さんら事務の方々にお世話になりました。事務の方々の好意的な協力があるから、宇宙探査が可能になっていくのだと再認識しました。また富士河口湖町には、教育委員会の杉本さんに窓口となっていただき、会場提供や、3月中はまだ一般には公開していない西湖コウモリ穴の調査で便宜を図っていただけました。皆さまに感謝致します。(春山純一)

## 古川宇宙飛行士による報告会 開催

古川聡宇宙飛行士による宇宙環境利用ミッション報告会が、3月26日に相模原キャンパスにおいて開催されました。

古川飛行士の報告の前に、宇宙環境利用科学として、国際宇宙ステーション (ISS) を利用した材料とライフサイエンス実験につ

いて、学際科学研究系の稲富裕光先生と筆者がそれぞれ紹介をしました。

古川飛行士は、5ヶ月半にわたるISSでの長期生活や実験の様子などを約16分間にぎゅっと詰めたビデオで、ミッション報告をされました。カザフスタンの射場へ向かう途中でバスを止めてタイヤにおしっこをするという、ガガーリン宇宙飛行士からの伝説の儀式(?)は本当だった、という話から始まり、ISSの「きぼう」日本実験棟で古川飛行士が携わった物質・材料系、ライフサイエンスなど、さまざまな実験を次々と紹介されました。全天X線監視装置 (MAXI) とアメリカの観測衛星との連携による巨大ブラックホールに星が吸い込まれる瞬間の観測は、とても素晴らしかったです。古川飛行士の専門である医学実験では、体



質問に答える古川宇宙飛行士

を回しても眼振はあまり出ないが「目はグルグル回っていた」という、実に興味深い結果も報告されました。宇宙では歩く必要がないので足の裏が赤ちゃんのように赤く柔らかい皮膚になる様子や、多忙な中での食事風景や運動、掃除機のように吸い取る散髪や

トイレ、歯磨き後に吐き出さず飲み込む様子など、面白い話も聞くことができました。キューポラという出窓から観察したオーロラの幻想的映像は、とても印象深いものでした。

参加者は約70名で多くの学生の方々が参加したこともあり、質疑応答が活発に行われました。科学的な質問だけでなく、「なぜ博士号を取ったか?」「なぜ宇宙飛行士になりたかったのか?」「日本版宇宙船に乗りたくないか?」や、事務作業の効率と宇宙での作業効率についてなど、いろいろな角度からの質問が出ました。それらの質問に、古川宇宙飛行士は終始笑顔でユーモアを交えながら、ときには質問者のそばまで行って対話するように、丁寧に対応されていました。参加者の若いエネルギーにあふれた報告会となりました。(石岡憲昭)

# イプシロンロケットが拓く 新しい世界

第4回

## イプシロンの基本諸元と 機体構成

徳留真一郎

イプシロンロケットプロジェクトチーム



イプシロンロケットには、全段固体モータによる3段式の「基本形態」のほか、第3段の上にポスト・ブースト・ステージ (PBS) が追加された「オプション形態」が用意されています。PBSは、搭載された小型の液体推進系 (M-Vの姿勢制御用エンジン程度のコンパクトなもの) と航法誘導制御系により液体ロケット並みの軌道投入精度を実現させるステージです。M-V型ロケットまでは衛星側で行っていた軌道調整をロケット側の輸送サービスに含めることによって、多様なミッションへの対応能力と利便性を高めて需要の拡大を図ろうというわけです。

全備質量約91トンのイプシロンは地球周回低軌道に1.2トンの衛星を運ぶ能力があり、同じ条件で1.8トンであったM-Vの3分の2の規模となっています。打上げ費用は、推進系や搭載機器の一部を基幹ロケット (H-IIA, H-II B) と共通化すること、材料を最新化し製造プロセスを効率化すること、射場の設備

と運用を革新的に簡素化することによって、M-Vのほぼ半分、機体の規模に対しても顕著な低コスト化が達成されます。また輸送性能の面では、1段モータ、2段モータの比推力がM-Vに比べて大きく向上するため、輸送効率 (ペイロード比=衛星質量/ロケット全備質量) はM-Vをしのぐことになるのです。

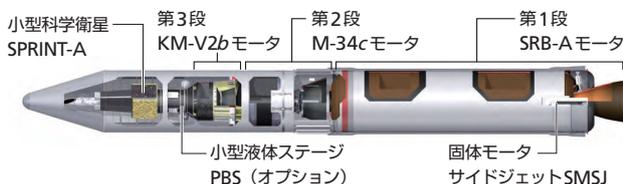
イプシロンの開発では、抜本的な低コスト化を目指す次世代型最終形態の実現に向けて、段階的な開発戦略を取っています。第一段階では、M-V、H-IIAの開発で培われた技術を最大限に活用して、開発の期間、コスト、リスクを抑えつつ、近い将来の小型衛星ミッションからの要求に応えるE-Xを開発します。その1段には基幹ロケットのSRB-Aモータが共用され、2段、3段には「はやぶさ」を打ち上げたM-V型ロケット5号機の3段モータとキックモータの設計を踏襲するM-34cモータ、KM-V2bモータがそれぞれ採用されます。搭載機器については、アビオニクスの一部が基幹ロケットと共通化されるほか、第一段階における最大のポイントであり射場運用の抜本的な簡素化に貢献する「自律点検システム」が新規に開発されます。機体構造については分離機構を含めた多くのコンポーネントがM-Vの継承品や基幹ロケットからの流用品ですが、各段の機器搭載構造やフェアリングは新規開発になります。推進系では、1段燃焼中のロール制御と1段燃焼終了後の3軸制御を受け持つ固体モータサイドジェット装置、第2段に装備される姿勢制御用ガスジェットシステム、PBSの小型液体推進系が、M-VやH-IIAの技術を継承・発展させる形で新たに開発されます。

開発の第二段階においては、E-Xの開発と運用の成果を踏まえて地上支援設備を含めたシステム運用のさらなる簡素化や機体コンポーネントの抜本的な低コスト化を進め、さらに第一段階以降のニーズの変化にも対応する次世代型E-Iを開発します。E-Iは、第一段階の開発と並行して行っている要素技術研究の成果に基づいて、低コスト、高性能で利便性に優れた、新しい宇宙時代を切り拓く目的にふさわしい輸送システムになることでしょう。

イプシロンは、M-Vまでに確立された固体ロケットシステム技術を確実に引き継ぎ、さらにそれを効果的に発展させたロケットです。自律点検に代表されるシステムの革新コンセプトは、高頻度で多数回の運用を目指す将来の再使用宇宙輸送システムに必須のものでもあります。伝統ある日本独自の固体ロケットシステムは、イプシロンによって、従来の衛星打上げ手段としてだけでなく、次世代輸送技術を開拓するワークホースとしても役立つことになるのです。

(とくどめ・しんいちろう)

### イプシロンロケットの概要



項目	諸元	
ロケット	イプシロン (E-X)	M-V
機体構成	3段式 (液体ステージ追加可)	3段式 (キックステージ追加可)
直径	2.5m	2.5m
全長	約24m	約31m
全備質量	約91トン	約140トン
打上げ能力*	LEO: 1.2トン	LEO: 1.8トン
打上げ費用	約38億円	約75億円
基盤技術革新	自律点検機能	高性能固体推進薬
打上げ年度	初号機2013年度	1996~2006年度
打上げ場所	内之浦宇宙空間観測所	

\*LEO (高度250km × 500kmの地球周回低軌道) に換算した能力

### オプション形態によるイプシロンロケットの軌道投入精度

軌道	高度誤差	軌道傾斜角誤差	打上げ能力
地球周回低軌道 ・高度500km円軌道 ・軌道傾斜角30.5°	±20km	±0.1°	700kg以上
太陽同期軌道 ・高度500km円軌道 ・軌道傾斜角97.4°	±20km	±0.2°	450kg以上

## 上海

### なぜか

2011年10月中旬から2012年3月初旬にかけて、中国科学院 上海珪酸塩研究所を計4回訪問し、今後の中国の回収衛星やスペースラブ・モジュール、2020年以降の中国宇宙ステーションについての情報収集、意見交換、また後述する回収衛星実験の準備に関する打ち合わせなどを行った。JAXAの同行者はISS科学プロジェクト室の余野健定 主幹研究員、旧宇宙環境利用科学研究系（現在は学際科学研究系）の依田真一 教授であった。上海珪酸塩研究所へのアクセスは、羽田空港から上海虹橋空港まで4時間弱、空港から最寄り駅の中山公園まで地下鉄で30分、あとは徒歩で5分程度であり、羽田空港からの利便性は良い。

1992年から始められた日中微小重力科学ワークショップなどを通じて、依田先生が中心となって中国科学院と共に微小重力科学実験に関する日中科学協力ミッションの構築を行ってきた。

中国は継続的に回収衛星を利用した微小重力科学実験を計画しており、材料科学の分野では上海珪酸塩研究所の刘岩 (Liu Yan) 教授を中心として回収衛星搭載用温度勾配炉と試料を入れるカートリッジの開発が行われている。そこで、依田先生、余野さんは共にその温度勾配炉を使った長期間微小重力実験を日中協力により進める方法を模索し、2014～15年ごろに打上げ予定の回収衛星「実験10号」での結晶成長実験の可能性を得るまでに至った。中国では科学研究の推進においても人間関係が重要な要素の一つであり、お二人の努力のたまものである。その後、2010年に日中共同研究チームが発足して、中国側との調整の進展により2011年には日中合作の供試体が「実験10号」の搭載候補となった。

しかし予備検討期間は2011年度初めの時点で1年程度しか残されておらず、その後3年以内に供試体開発、フライト実験計画策定を終了させなければならないことが明らかになった。このような中

国側の事情への素早い対応は今後も求められるので、「実験10号」実験についてはJAXAが主体となりパスマインダーとして計画を進めて日中科学協力関係を構築し、日本側の研究コミュニティへの橋渡しを行うこととした。搭載用温度勾配炉の試料スペースは14本分あるが、そのうち日中共同研究として2本分の提供を受ける予定である。日本側の役割は、中国回収衛星で実施可能かつ科学的意義の高い結晶成長実験の詳細な検討を行い、フライト用試料アンブルを製作することとした。そして中国側研究者とともに本宇宙実験で得られる結晶の構造と物性の精密測定を行うことで、結晶内の欠陥および組成と光学的特性の関連性を解明することを目指す。国際協力による宇宙科学研究の推進の観点では、(1) 日中双方の宇宙技術、人材、装置などの資源の有効利用、(2) 宇宙環境利用科学における国際的な宇宙プロジェクト推進体制の構築、(3) 日中両国の学術交流の促進、が期待される。なお、本件を推進するに当たって宇宙研の各研究系やISS科学プロジェクト室、そして所内の多くの方々からご理解、ご支援を頂いたことをこの誌面を借りて深く感謝する。

最後まで堅い内容のまま終わってしまうのは申し訳ないので、上海での食事、お勧めスポットについて触れる。ご存知のように上海料理は中華料理の代表的なものの一つであり、特に小籠包、上海ガニは有名である。昨年10月に訪問したときの歓迎の宴では、旬の上海ガニを堪能した。ほかの訪問の折には、ホテル近くのレストランで依田先生、余野さんと共に小籠包や水餃子を頬張ったのが良い思い出となった。そして、会合の合間に連れ出してもらった濱江大道は黄浦江沿いに延びる大変気持ちの良い散歩道であり、対岸に外灘の古い建築群が立ち並ぶ姿を見ることができたのでとても良いリフレッシュとなった。

上海には上海浦東国際空港もあり、中山公園まで50kmとやや離れているが日本からの便数が多い。そこから上海市内までは、龍陽路駅まで7分のリニアモーターカー（乗車料金50元）が便利である。空港内の行き先案内版には「磁浮」と書いてあるので、分かりやすいだろう。加えて新幹線・地下鉄などの鉄道網、高速道路網が大変充実しており、上海は今、アジアの中でも屈指の魅力的な都市といえよう。

(いなとみ・ゆうこう)



上海珪酸塩研究所での会合。依田先生(右から6番目)、Liu先生(7番目)、早川泰弘先生(静岡大学、4番目)、余野さん(3番目)、筆者(5番目)。

### 稲富裕光

学際科学研究系 准教授



# 「宇宙総合工学」のすすめ

今から30年近く前になるが、小田稔先生に連れられてアメリカ・カリフォルニアでの国際研究会に参加したことがある。そのとき、カリフォルニアの空の下で飲んだビールがたいへんおいしく、以来、晩酌が日常になってしまった。この先の健康に気を使うべき年齢になってきて、昨今は、心して休肝日を取るようになっている。今回、「いも焼酎」への寄稿の依頼をいただいたが、こちらも休肝日ということで、少々堅いことを書かせていただく。

言うまでもないが、宇宙空間を利用していくためには、飛翔体を用意し、必要な装置を宇宙空間に持ち出さなければならない。国として宇宙空間を利用した各種計画が動いていくためには、宇宙空間の利用を必要とする利用母体がそれぞれの大きな長期的目的のもとに責任を持って具体的な宇宙空間利用計画を推進する、いわば縦系の部分と、さまざまな利用の要求に応えそれぞれの飛翔体計画の実現に協力するとともに、インフラを整備しつつ宇宙空間利用の新しい技術的可能性を拓いていく、いわば横系の部分が、それぞれ適切に整備され、両者がうまくかみ合わされることが必要となる。

縦系の部分は、宇宙開発の成果が具体的に国民に還元されていく意味で非常に重要である。今回の宇宙開発体制の見直しにおいては、縦系それぞれについての政策的重み付けを行うことや、縦系間の調整といったことについて、新しい体制の整備がなされようとしている。一方、横系に関しては、横系の中心となるべきJAXAと、縦系たる各利用省庁の関わり方が整理されつつあるのみで、横系のあるべき姿については、十分な議論が行われているとは言い難い。

元来、さまざまな利用目的を持つ「宇宙開発」を国として一括して推進する理由は、

- 宇宙空間利用の新しい可能性を拓き、人類文明の持続的発展に貢献する

井上 一

宇宙航空研究開発機構 名誉教授

- 宇宙空間利用のインフラ・技術・人材を共有して効率的展開を図ることにあるはずである。宇宙空間利用の新しい展開がもたらされるには、10年を超える長い年月が必要であるから、上記の活動を展開するに当たっては長期的視点・戦略を持つことが不可欠である。宇宙開発には「将来への投資」の側面があることを忘れずに、宇宙開発のさまざまな利用に対応できる柔軟なインフラ・技術の開発といった視点から大きな方向付けをしつつ、ある規模以下の開発研究を定常的・競争的に行いながら進む体制・活動があるべきである。そしてそこには、国としての宇宙開発の推進に関し、技術・インフラ・人材に関する一貫した道筋をつくっていく機能が託されるとよい。これらの点に関しては、宇宙研を核とした大学・研究機関の関わりが大変重要で、それらが果たすべき役割が不可欠と考える。

これらの活動を牽引するものとして、未



1983年夏、カリフォルニア・サンタクルーズにて。前列左が小田稔先生、一人挟んで立教大学の柴崎徳明さん、その後ろが筆者。

踏の宇宙空間利用の可能性を探り、人類としてのさまざまな活動の最前線を切り拓く「宇宙探査」が置かれるべきであろう。そして、「人類未踏の領域への挑戦」から「宇宙空間利用の新しい可能性」が生まれ、それが成熟して「宇宙空間利用のインフラ」となり、「宇宙空間利用の新しい広がり」が生まれていく、という大きな流れが考えられていくべきである。同時に、その挑戦的活動の中から発生した課題を自分の頭で考え自分の手を動かして解決していく「宇宙エンジニア」が育ち、さまざまな宇宙利用活動を大きく支えていく体制がつくられてこそ、宇宙開発に堅固な柱ができるというものである。それらの長期的・継続的活動を責任を持って推進していくところとしては、宇宙研・大学を中心に従来からの小規模飛翔体実験プログラムを強化・拡張し、JAXA内の位置付けや産業界との連携も強めて、宇宙空間の新しい利用技術・インフラを切り拓き、次代を担う宇宙エンジニアを育成する、「宇宙総合工学」とでも呼ぶべき研究開発・人材育成体制を構築していくべきと考える。

宇宙科学においては、縦系要素の強い宇宙理学と、横系要素の強い宇宙工学が、大変うまく力を出し合って、科学の最前線を切り拓くとともに、宇宙空間利用の新しい可能性も切り拓いてきた。強い実現意欲を持った計画提案者からの挑戦的で創意あふれるミッション提案群と、透明で公平な競争による計画選定と、計画実現に向けた相互批判的かつ互恵的環境が、その成果を生み出してきた。今や、国としてのさまざまな利用に対しても、長期的・人類的視点で関わっていく活力のある「横系」の存在があるべきだと強く思うところである。

ここは、休肝日などと野暮なことを言わず、いも焼酎でも一杯やって、皆で大いに気勢を上げるべきところかもしれません。

(いのうえ・はじめ)

