

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2022年5月号



2022年度宇宙倫理学教育プログラム(SEEP)が始動しました！

京都大学宇宙総合学研究ユニットで実施される「宇宙倫理学教育プログラム」(SEEP)の各科目が4月から開講され、同プログラムが本格的に始動しています。大学内外から多くの応募をいただいた中、最終的に13名の方(うち学内コース10名、一般コース3名)が本プログラム受講生として採用されました。受講生は必修科目(宇宙倫理学入門、宇宙総合学/宇宙学、倫理学講義、宇宙倫理学演習、宇宙倫理学ゼミ)および選択科目を履修しながら、各自が設定したテーマに沿いながら研究を進めていきます。最終的には研究の成果報告を行うことで、受講生にはプログラム修了証が発行されます。

4月後半からはさっそく宇宙倫理学ゼミ(毎週月曜5限)も学内で始まり、受講生のみなさんが集まって互いに顔合わせ・自己紹介を行いました(写真参照)。受講生の所属・バックグラウンドはさまざまな分野の学部生・院生から社会人の方まで多岐に及びますが、みなさんが独自の問題意識や興味関心を抱きながら参加しています。学内コースからは、法学や経営学、倫理学、歴史学などの文系分野の学生のほか、工学、宇宙物理学、健康科学、環境科学などの理系分野の学生が受講しています。一般コースからは、民間企業勤務の方や、京都市内の寺院の住職の方などにもお越しいただいています。

すでに数名の受講生から自己紹介を兼ねた発表もしていただきましたが、いずれも発表者独自の視点が織り込まれた興味深い内容です。毎回のコメント・議論も盛況で、受講生の本プログラムへの取り組みに対する熱意・思い入れが感じられます。多様なバックグラウンドをもつ受講生が一堂に会する貴重な場であるゼミを通し、受講生同士の知的な相互交流が早くも生まれつつある様子で、受講生のみなさんの今後の発表内容や精進が大いに期待されます！



学際性の再考

桑島修一郎

京都大学大学院総合生存学館

1. 科学技術政策と産官学連携

現在の所属である大学院総合生存学館から当宇宙ユニットに参加させていただいているが、筆者の専門分野は？という、自然科学研究者→政策立案者→産官学連携実務者といったキャリアからも、正直紹介が難しい。とはいえ、現在の研究活動は、やはり後半2つのキャリアの影響が大きくこれらの内容を中心に展開している。具体的には、科学技術（最近では“・イノベーション”が付加されているが）政策を横目で眺めつつ、産学連携や実践教育における課題を分析するだけでなく、有効に機能させるところまで試みている。

少し振り返ると、筆者が政策立案に携わっていた2010年頃までは、イノベーションとは企業の問題であり、あくまでも大学はそれを支える役割とされていたように思われる。しかしながら、オープン・イノベーションブームの到来と、おそらく2011年の大震災がきっかけであったと思うが、大学も主体的にイノベーションに関与することを前提とした大型の施策が目立つようになった。さらに、GAFAM（Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft）と言われるプラットフォーマーの台頭が決定的であり、それまで、強固な既得権益を崩すために無理筋の“イノベーション”を連呼していた時代から、実際にイノベーションを実現しなければならなくなったという危機感と焦りを感じる時代へと急速に変化したように思う。

2012年に大学に戻り、産官学連携業務を始めた際にもその変化をすぐに認識することができた。それまでの産官学連携といえば、理工系を中心に個々の研究成果をもとに企業と共同研究をしたり知的財産化したりするのが一般的であったが、特に大手企業からの相談内容として、いわゆる文系を含む多分野との連携を希望するものが多くなった。言い換えれば「学際性」への関心の高まりを示していたのだと思う。ちょうどこの頃は第5期科学技術基本計画が策定される前後でもあり、この時に提案されたSociety5.0が象徴的であるが、急速なデジタル化社会への変貌を見据えたサイバー・フィジカルの融合をどのように具現化するかを重視していた時代と重なる。そして、現在の第6期基本計画では、「総合知」といった概念が表れ、人文・社会科学系の一部も科学技術政策に取り込むことが可能となった。“イノベーション”への期待が政策的なキーワードから実際の価値創造へと移る中で、科学技術そのものだけを対象にすることの限界が今になって露呈してきたとも言える。

2. 「学際性」への期待の高まり

日本語では「学際性」と一言で表現されることがほとんどであるが、欧州を中心に古くから *disciplinarity* の多義性について議論の蓄積があり、大きくは *multi-disciplinarity*、*inter-disciplinarity*、*trans-disciplinarity* の3つに分類され、それぞれの意味を記述すると以下のように

なる[1,2]。

multi-disciplinarity :

研究対象や解決を必要とする理論的・実践的な問題が、2つ以上の無関係な学問分野の視点から、相互に影響し合うことなく、連続的かつ分離してアプローチされること。相対的に独立した多数の学問分野が参加するコミュニティの伝統的なアプローチ。

inter-disciplinarity :

複数の確立された学問分野が相互に作用し、与えられた研究対象の複雑さを説明、分析、理解できるようにすること。単に異なる分野の視点を並べるだけでなく、共通の対象に対する各分野からの協力的かつ統合的なアプローチ。

trans-disciplinarity :

2つの主要かつ補完的な方向性。1つ目は認識論的、理論的に既存学問の境界を越えて知るプロセスであり学問区分を大きく再構成すること。2つ目はより実践的、参加的、応用的であり、政治的、社会的、経済的なアクターや一般市民を、「問題解決」の観点から研究プロセスそのものに参加させること。

歴史的には、いわゆる社会課題として認識されるものが多様化し、複雑化したために従来の multi-、inter-の概念を超えて trans-disciplinarity の必要性が認識されるようになった。この分類に従うと、multi-、inter-disciplinarity と trans-disciplinarity との間には大きな違いがあり、前者は研究者コミュニティの中だけで閉じることが許されるが、後者は企業や社会と一緒に discipline を構築しなければならないことになる。最近の産学連携に求められるのは正に trans-disciplinarity の構築であるように思うが、経験上「言うは易し・・・」であり、特に研究大学といわれる大学で実現することは相当に困難であるように思われる。一方で、企業や社会といった大学コミュニティの外で、それぞれの discipline が独立に発展してきた必然性や、上記「学際性」の多義性についての認識が浸透しているようにも思えず、大学に期待される社会との接点の持ち方における大きな課題ではないかと考えている。

3. 新たな価値体系

話を大学に戻すと、研究環境の劣化が否めない現状に加えて、社会に向けたさらなる貢献が義務化され、また財政面でも大学自ら予算を確保していく方向性が定着しつつある中で、今後も産学連携や実践教育に対する学外からの関心は高まっていくと思われる。そのような中で、様々な「学際性」を新たな価値体系で表現し、価値観の異なるセクター間で価値を共有する仕組みを作ることが必要ではないかと考えている。しかしながら、実際に多くのステークホルダーが満足する結果を生み出すことは相当に難しく、多くが重要だと認識していても、なぜか最終的な意思決定では過小評価されてしまうことなども多々見受けられる。多様な価値観が持続的に共存する状態に見える化できないか？数学屋には怒られそうだが、使えるものは何でも使いたい元物理屋としては、図1に示すように、価値の要素を複素数のように実部と虚部に分けて捉えてみるようなことを考えている[3,4]。実は過去にも、当時中心的な価値であったものづくりを「実業」と表現し、実態は見えにくいけれども確実に存在する情報を扱う産業を「虚

業」として情報産業の台頭を予言していたり [5]、2010年代には社会において、実と虚双方を含む複素数の概念を用いた思考が重要になることを指摘していたり [6]、同様の着想は知られている。

筆者が関係してきた分野だけでも、一般に認識されやすい価値の要素を実部として、逆に重要視されつつも認識されにくいそれを虚部としてベクトル配置してみると興味深い構図が見えてくる。日本の産業の中心であるものづくり産業や、それを取り巻く政治、法律、行政、さらには防衛や外交も、多くは実社会で物理的に起こり得る事象に対する価値観に連動する。健康や医療においても、健康であること自体に価値を認識することはさほど容易ではなく、多くは病気や怪我を回避するための価値と認識される。一方、実部のものづくりに付随するサービスや、ブランドと言った心理や内面に訴える無形の価値要素が考えられるし、実部の政治、法律、行政とは表裏一体の関係と言える文化、芸術、思想、倫理が含む価値も虚部と見做すことができる。また、SDGs への関心の高まりが象徴的であるが、これまで、実部として表されるようなリアルな発展や成長に対する価値観が支配的であったとすると、地球の物理限界であったり、既存の経済システムの限界であったり、今回のコロナ禍や国際紛争が決定的となり、国、地域、個人の間での共存や相互理解といった、これまで認識されにくかった価値観の重要性はさらに高まっていくと思われる。

このように複素数の概念を用いることで、多様な価値要素の優劣を考えるのではなく、それらすべてから構成される複素価値が真の価値であるという思考が醸成されることが「学際性」の意義と言えるかもしれない。ただし、それぞれの事象において実部と虚部をどのように設定するのか？特に虚部の定義であったり、位相角であったりをどう定量的に評価するのか？等々、本質的な課題はしっかりと残されている。今回、多様な分野の専門家が集い、「宇宙」という未踏の領域に果敢に挑戦する当宇宙ユニットに参加させてもらうことで、「複素価値」の特に虚部に接することができないかと期待していることを告白して本稿を終わりたい。

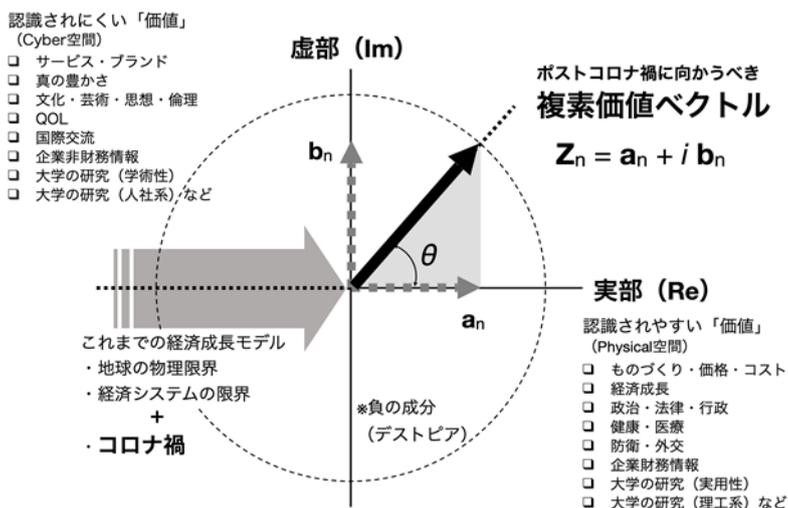


図1 新たな価値体系における「複素価値」の概念図

参考文献

1. Introduction Futures of Transdisciplinarity, Futures, 397-405(2004).
2. F. Darbellay, Rethinking inter- and transdisciplinarity: Undisciplined knowledge and the emergence of a new thought style, Futures, 163-174(2015).
3. 桑島修一郎, 新たな産学官連携に向けた複素関数論的一考察, 研究・イノベーション学会年次学術大会講演要旨集, 443-446(2020).

4. 桑島修一郎, 文理融合が目指す価値創造 -「複素価値」の考え方, 研究・イノベーション学会年次学術大会講演要旨集, 112-115(2021).
5. 梅棹忠夫, 情報の文明学, 中公文庫 (1999).
6. 佐藤典司, 複素数思考とは何か。-関係性の価値の時代へ-, 一般財団法人経済産業調査会 (2016).

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.uss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507 号室

編集人：今井慶悟(宇宙ユニット RA)

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: uss@kwasan.kyoto-u.ac.jp

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2022年6月号



宇宙倫理学教育プログラム（SEEP）の様子をご紹介します！

2022年4月から開講された京都大学宇宙総合学研究ユニットによる「宇宙倫理学教育プログラム」(SEEP)は、13名の受講生（京大文学部生5名、同大学院生5名、一般受講生3名）を得て、順調に講義およびゼミによる研究活動が進んでおります。講義（宇宙倫理学入門：毎週月曜4限）は主に宇宙総合学研究ユニットの清水雄也特定助教が担当し、宇宙開発に関わる技術的な問題や、それに付随する倫理的な問題点について、学生たちと意見を交えながら授業が行われております（図1参照）。この講義では、宇宙開発に関わる全般的な問題点（宇宙資源の分配、スペースデブリ、テラフォーミングなど）を扱うことで、受講生は宇宙倫理学の基礎的知識の獲得し、自身が関心をもつ分野の位置付けを学ぶことを目標としています。

月曜5限のゼミ活動（宇宙倫理学ゼミ）では、各受講生の関心分野における宇宙倫理問題について研究をおこなっています。毎週、複数の受講生が、調べたこと、考えたことをスライドを使って発表し、それを元に全体でディスカッションを行っています。テーマは「宇宙エレベータ」「宇宙条約と南極条約」「宇宙ニュースとメディアの在り方」など多岐に渡り、毎回じつに活発な意見交換がなされています。



図1（左、右）：「宇宙倫理学入門」講義風景。この講義は京都大学文学部提供の正規の講義として開講され、「宇宙倫理学プログラム」受講生に限らず、京大の他学部・研究科の学生も参加しています。

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
7月14日 (木)(予定) 開始時間は決まり 次第 HP に掲載い たします	第5回宇宙学セミナー 講師：三木 健司 氏 (京都大学 総合生存学館 特定助教) 題名：決まり次第 HP に掲載いたします	Zoom によるオンライン開催です。準備 ができ次第、HP に掲載いたします。

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.uss.s.kyoto-u.ac.jp/seminar/>) で公開いたします。

放射線計測とその医学・宇宙応用

上ノ町 水紀

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

先月（2022年5月）、宇宙総合学研究ユニットの特定助教に着任しました上ノ町水紀と申します。実は私の専門は宇宙物理学や天文学に関わる研究ではありません。本稿では、自己紹介として、私の専門である放射線計測技術及び核医学イメージング研究とその宇宙への応用について簡単にご紹介させていただきます。

放射線計測技術

放射線とは高いエネルギーを持って飛ぶ電磁波及び粒子線のことを指しますが、一般的には物質を通過する際に原子から電子を弾き飛ばす（電離する）電離放射線のことを指します。X線やガンマ線は電磁波に分類される放射線で、粒子線に分類される放射線としてはアルファ線、ベータ線、電子線、中性子線などがあります。地球には大気圏外から絶えず宇宙線が降り注ぎ、また大地に含まれる放射性物質から放射線が放出されているので、私たちは日常的に放射線を受けています。放射線は目には見えませんが、放射線を可視化したり検出したりすることができます。

ではどのようにして放射線を検出するのでしょうか。放射線を検出するには放射線と物質との相互作用を利用します。具体的には、気体との電離作用を利用したガス検出器、固体との電離作用を利用した半導体検出器、物質との励起作用を利用したシンチレータ検出器が一般的に開発・利用されています。ガス検出器では電離により生成される電子イオン対、半導体検出器では電離により生成される電子-正孔対を電気信号として変換し、放射線の量（エネルギー）を検出します。シンチレータ検出器で

は励起された原子が基底状態に戻る際に放出する光を光センサを介して電気信号に変換します。放射線計測技術は実験核物理や素粒子実験、X線・ガンマ線天文学、原子力分野、医学分野などの幅広い分野で利用されています。検出器や物質の種類により、大きさ、効率、エネルギーや時間分解能、製作コスト等が異なるので、それぞれの目的に応じた検出器が利用されています。

核医学イメージング

では次に、放射線の医学応用の一つである核医学に関する研究について簡単にご紹介します。核医学とは、放射性医薬品を用いて病気の診断や治療を行う医学の分野の一つです。

核医学検査では、透過力の高い X 線やガンマ線を放出する放射性核種を化合物に標識した放射性医薬品を体の中に注入します。そして、体外から X 線やガンマ線を検出して医薬品の体内分布を可視化することで、体の機能や代謝情報が取得でき、病気の診断が行われます（図 1 左図）。例えば、PET(Positron Emission Tomography)検査では、 ^{18}F -FDG(^{18}F -fluodeoxyglucose)という医薬品を使った検査が多く行われています。 ^{18}F -FDG はグルコースとよく似た構造をしており、糖代謝を反映します。悪性度の高いがん細胞ほど多くのブドウ糖を取り込むので、 ^{18}F -FDG はがんにも集積します。核医学イメージングでは、レントゲンや CT のような形態情報ではなく機能や代謝情報を反映するので、レントゲンや CT では発見しにくい小さながんも ^{18}F -FDG の PET 検査では発見しやすく、がんの早期発見に貢献しています。

一方で治療（内用療法とも呼ばれる）では、透過力が低く、エネルギー付与の大きいアルファ線やベータ線を放出する放射性医薬品を体内に投与します。これらの医薬品は特定の病変に集積するように設計されており、アルファ線やベータ線を用いて体内から治療することができます（図 1 右図）。これらの放射線は体外から検出することはできませんが、アルファ線やベータ線のほかに X 線やガンマ線も放出する核種もあり、その場合は体内分布を可視化することが可能です。

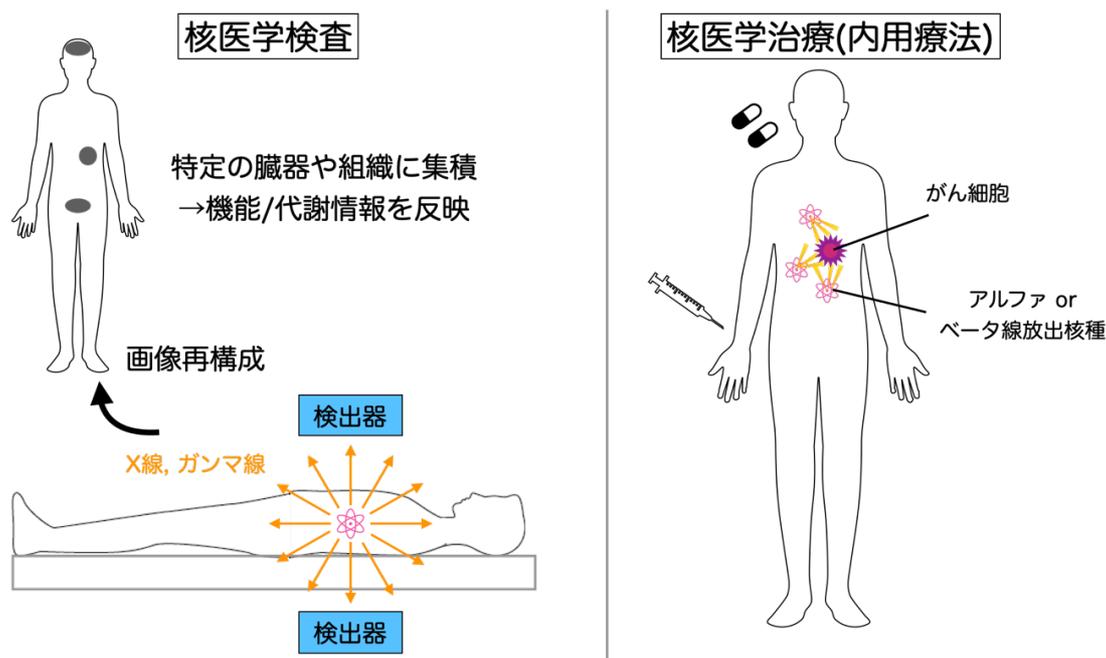


図 1. 核医学検査(左)と核医学治療(右)

X線やガンマ線を検出し、医薬品の体内分布を可視化（イメージング）するには、検出した放射線がどこから来たのか、その場所を推定することが必要です。現在、臨床で用いられている技術としては、PETとSPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)があり、それぞれ放射線の飛来方向の推定手法が異なります。PETは陽電子が近くの電子と対消滅をする際に放出される511 keV（キロ電子ボルト）の2本の消滅ガンマ線を同時計測します（図2左図）。この消滅ガンマ線は対向方向に放出されるので、同時計測により放出位置は計測地点を結んだ直線上に推定できます。つまりPETでは陽電子放出核種のみ可視化されます。一方でSPECTは、鉛やタングステン等の重い金属に穴を開けたコリメータを検出器の前に配置することで物理的に放射線の飛来方向を制限します（図2右図）。SPECTではコリメータを透過しないエネルギー（一般的には400 keV以下）のX線・ガンマ線を放出する核種（単一光子放出核種）が利用できます。しかし、コリメータを用いるため感度と空間分解能はトレードオフの関係にあり、臨床機器ではPETの方がSPECTよりも感度・空間分解能・定量性に優れています。

従来の核医学イメージング手法

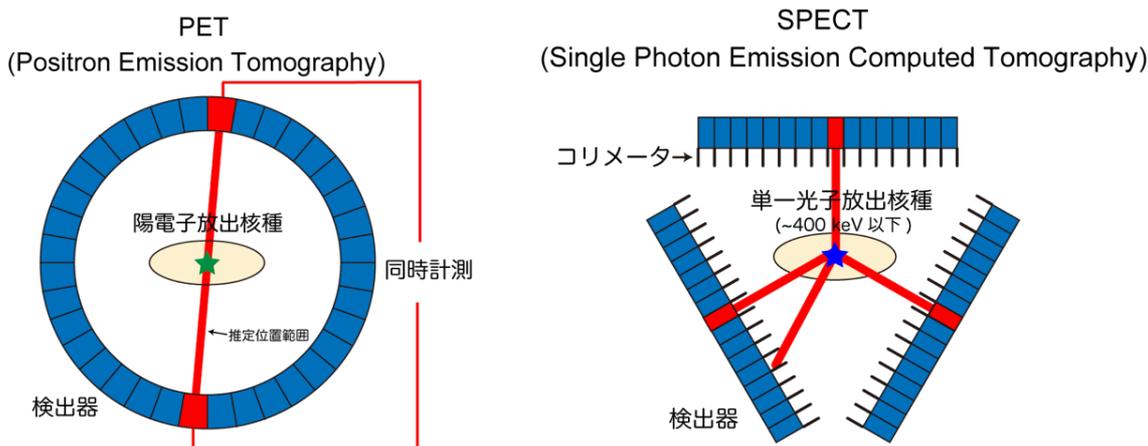


図2. 核医学イメージングの原理（左）PET、（右）SPECT

このように、臨床で用いられているイメージング技術では、原理の違いにより利用できる放射性核種（放射性医薬品）が異なります。また、そのためにPET/SPECT核種の同時撮像が難しいという課題があります。多核種同時イメージングは、撮像タイミングの違いによる生理機能の違いを排除し、同一座標上に複数の医薬品の可視化画像を取得することができるため、診断精度の向上や検査回数の低減などが期待されます。

このような背景のもと、私たちは新しい多核種同時イメージングシステムや新ガンマ線イメージング手法の開発検証を行っています。まず、一つがPET/SPECT同時撮像手法としてコンプトンPETハイブリッドカメラを提案・開発しました（図3左図）[1]。本手法ではPET核種は従来のPETイメージング、SPECT核種はコンプトンイメージングで可視化し、PET/SPECT核種の同時撮像を実現します。コンプトンイメージングとは放射線と物質の相互作用の一つであるコンプトン散乱原理を利用したイメージング手法です[2]。一般的には散乱体と呼ばれる検出器でコンプトン散乱、吸収体でその散乱光子を同

時計測します。それぞれのエネルギーから散乱角度 θ が算出され、さらに検出位置から放射線の放出位置を角度 θ の円錐面上（コンプトンコーン）に制限することができます。原理的にコンプトン散乱を検出できれば良いので、SPECTのようなコリメータが不要かつ、原理的には数百 keV ~ 数 MeV（メガ電子ボルト）程度のエネルギーのガンマ線の可視化が可能です。コリメータを用いないためコンプトンカメラを対向方向に配置することで PET イメージングも同時施行することができます。コンプトンイメージングでも PET 核種のイメージングは可能ですが、PET イメージングの方が感度・空間分解能・定量性に優れているので PET 画像も出せることは画像を評価する際に大きなメリットがあります。私たちは高分解能 Gd₃(Ga,Al)₅O₁₂(Ce) (GAGG)シンチレータ検出器を用いたシステムを開発し、実際に 18F-FDG(PET 核種)と 111In 抗体 (SPECT 核種) の体内分布を PET およびコンプトンイメージング両原理による同時撮像に世界で初めて成功しました [3]。

また、新ガンマ線イメージング手法として二光子同時計測法によるイメージング手法の検証も行なっています。PET では対向方向に放出される消滅ガンマ線を同時計測して位置推定を行っていました。一方、放射性核種の中には 2 本以上のガンマ線を短い間隔で連続的に放出する核種（カスケード核種）があります。例えば SPECT 核種である 111In は 171 keV と 245 keV のガンマ線を連続放出します。このことを利用すれば、各ガンマ線の飛来方向が推定でき、かつ、放出角度が対向方向以外であれば、同時計数を取ることで各飛来方向の交点に核種の位置を特定できます。この二光子同時計測法をコンプトンイメージング（図 3 真ん中）[4]、および物理的コリメータを用いたイメージング（図 3 右図）[5]に適用させ、実機により位置特定が可能であること、また、非同時計数の場合よりバックグラウンドが大幅に低減できることを実証しました。更に、二光子同時計測イメージングの発展技術として、2 本のカスケードガンマ線の角度相関が局所の電磁場により変化することを利用した位置特定と局所情報の同時取得技術の開発研究も行っています [6]。実際に 111InCl₃ 溶液を用いて、pH や標識前後で角度相関が変化すること、また、コリメータを用いて位置の特定だけでなく、角度相関変化から pH の違い（酸性側 or アルカリ性側）を抽出できることを実証することに成功しました。本技術は従来集積情報しか得られなかった核医学イメージングにおいて、初の全身分子間相互作用イメージングの実現が期待できます。

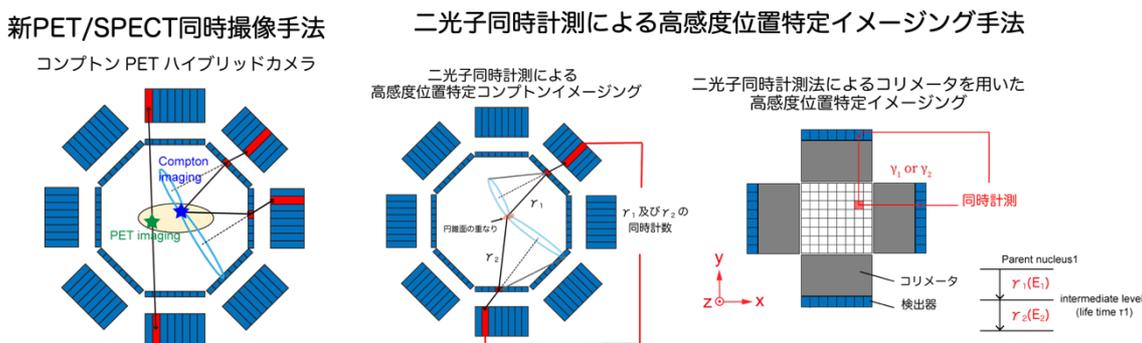


図 3. 筆者のこれまでの研究。(左)PET/SPECT 核種同時撮像を目的としたコンプトン PET ハイブリッドカメラの原理。(真ん中)二光子同時計測法による高感度位置特定コンプトンイメージングの原理。(右) 二光子同時計測法によるコリメータを用いた高感度位置特定イメージングの原理。

今後の研究とまとめ

本稿では私の専門である放射線計測技術と核医学イメージング研究について簡単にご紹介させていただきました。核医学イメージング研究自体は宇宙のことと直接的な関係はありませんが、ガンマ線イメージング技術や放射線計測という基礎技術は宇宙観測にも用いられている共通の技術です。各分野によって重要な性能は異なりますが、基礎技術の分野横断は可能です。私は宇宙ユニットにおいて、宇宙 X 線観測用に研究開発されている SOI (Silicon on Insulator) 技術を用いたピクセルシリコン検出器 (XRPIX) の開発を中心に研究を行っていく予定です。さらに、その基礎技術を核医学イメージングのシステム開発にも応用していきたいです。

参考文献

- [1] K. Shimazoe et al., "Development of simultaneous PET and Compton imaging using GAGG-SiPM based pixel detectors", NIMA, 954, (2020) 161499
- [2] R. W. Todd et al., "A proposed γ camera", Nature, 251, (1974) 132-134
- [3] M. Uenomachi et al., "Simultaneous in vivo imaging with PET and SPECT tracers using a Compton-PET hybrid camera", Sci. Rep., 11, (2021) 17933
- [4] M. Uenomachi et al., "Double photon emission coincidence imaging with GAGG-SiPM Compton camera", NIMA, 954, (2020) 16182
- [5] M. Uenomachi et al., "Simultaneous multi-nuclide imaging via double-photon coincidence method with parallel hole collimators", Sci. Rep., 11, (2021) 13330
- [6] K. Shimazoe et al., "Imaging and sensing of pH and chemical state with nuclear-spin-correlated cascade gamma rays via radioactive tracer", Commun. Phys., 5, (2022) 24

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507 号室

編集人：高口和也（宇宙ユニット RA）

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2022年7月号



宇宙倫理学教育プログラムの受講生を紹介します！

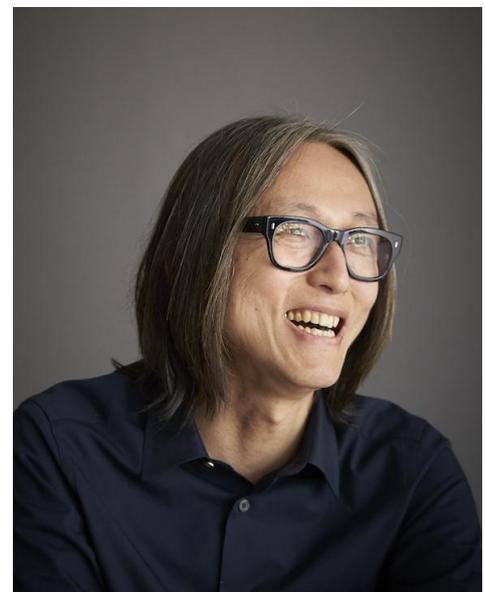
宇宙倫理学教育プログラム（SEEP）の近況を報告します。2022年度前期の講義・演習が徐々に終了していく中、7/11 時点を以て、受講生全体が顔を合わせる宇宙倫理学ゼミ（月曜5限）の前期分もひとまず終了しました。（後期は10月に開講の予定です。）宇宙倫理学ゼミでは、学部コース5名、大学院コース5名、一般コース3名（計13名）の受講生が、各自関心をもっているテーマについて、90分のうちに毎週2名ずつプレゼンを行うとともに、その内容についてみなでディスカッションをしています。今年度から本格的に始動したこうした SEEP の活動は、受講生のみなさまの協力もあって順調な進捗を遂げつつあります。実際、受講生同士の親睦も次第に深まっており、良好な学びの場が形成されています。また、現時点ですでに2周目の発表を行った受講生も多く、各自が研究テーマを少しずつ掘り下げながら精力的にプログラムに取り組んでいく様子が窺われます。

こうした中、折角の機会ということもあり、宇宙ユニット NEWS では今月号より、受講生のみなさまを順次紹介していくことになりました！今月号では記念すべき第一回受講生紹介として、一般コースから参加されている原田朋さんに自己紹介文を寄稿していただきました！

原田朋さん（一般コース）

原田朋(ともき)と申します。宇宙倫理学教育プログラムの一般コースに参加しております。30年前に大学で倫理学を学んだのですが、時を経て再び倫理学に取り組めることを大変嬉しく思っています。普段は、ニュースや生活情報を届けるインターネット企業の広報の仕事をしております。広報の仕事は幅広い方々に企業活動をお伝えし、よりよい信頼関係を築くことです。PRとも言われますが、本来 PR (Public Relation) とは「公共とのよりよい関係を」という意味です(PRという言葉は、語感が似ているからか、アピールするという意味で使われがちですね)。

私が勤めております企業が届けている情報の多くは「ニュース」と呼ばれるものです。2010年代以降、企業による宇宙開発のニュースが増えてきました。有名な経営者が宇宙旅行をしたとい



うニュースも目立ちました。私の関心は「ニュースの公共性」と「公共圏としての宇宙」の重なるところにあります。大きな流れとして、20 世紀の宇宙開発の主体は国家でしたが、21 世紀になって企業が宇宙開発を担うようになり、さまざまな宇宙企業・宇宙ビジネスが生まれていきそうです。企業活動である以上、利益を追求することになりますが、ファイナンシャルな利益のみを追求すると、社会との間に摩擦がおこったり、また自然環境にも負の影響をもたらすことがあります。また、空間的な意味でもビジネス的な意味でも、自力でフロンティアを超えた人や組織には先行者利益がもたらされるべきですが、それは永遠に独占されるべきものではないと考えられますし、またそもそも企業が占有するべきではない、と考えられる財もあります。

宇宙空間と天体を「公共財」と考えた時に、それは国家間や企業間でどのように配分されるのが正しいのか？ また、良い宇宙開発とはどのようなものなのか？ 宇宙開発は、人類の義務なのか、許可されているものなのか、あるいは、禁止されるべきものなのか？ そして、宇宙開発はどこまで公にする義務があるのか、どこまでは企業秘密としてよいのか？ ニュースは宇宙の何をどう伝えなければならないのか？ この三ヶ月で倫理学をふたたび学び直せば学び直すほどに、問いは大きくなっていきます。ゼミで一緒にいる多彩な方々の発表を聞かたびに、膨張する宇宙のように興味関心は広がり続けておりますが、今年後半は、先生方の助けを借りながら、研究領域を見定め、着陸したいと思います。

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
秋ごろ（詳細は決まり次第 HP に掲載いたします）	第 6 回宇宙学セミナー 講師：寺園淳也 氏（ムーン・アンド・プラネッツ） 題名：決まり次第 HP に掲載いたします	Zoom によるオンライン開催です。準備ができ次第、HP に掲載いたします。

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.uss.kyoto-u.ac.jp/seminar/>) で公開いたします。

Event Horizon Telescope による天の川銀河中心の 巨大ブラックホールの撮影と今後の展望

森山 小太郎
ゲーテ大学フランクフルト

2022年5月12日、国際共同研究プロジェクト Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration によって、巨大ブラックホール「いて座 A*」の姿が世界で初めて明らかとなりました (図1)。この天体は、私たちの住む太陽系を含んだ天の川銀河の中心にあり、私たちから最も近くにある巨大ブラックホールです。本稿では、いて座 A* を含むブラックホールとはなにかから説明し、いて座 A* の画像がどのように得られたのか、そしてその科学的な意義と今後の展望について簡単に説明します。



図1: 今年報道された天の川銀河の巨大ブラックホール「いて座 A*」の撮像結果。

ブラックホールとは何か

ブラックホールとは、非常に大量の物質が極限まで狭い領域に集中した、宇宙で最もコンパクトかつ高密度な天体です。ブラックホールの中心近くに形成される事象の地平面内に入ると、その強い重力場によって光でさえも外に抜けだすことができなくなります。ブラックホールごく近傍を撮影すると、ブラックホールシャドウと呼ばれる、事象の地平線の内側となる真ん中が暗い、リング状の構造となることが理論的に予測されていました。



図 2: 2017 年の EHT 観測に参加した 6 局の望遠鏡。

ブラックホール撮影の観測的課題と EHT

ブラックホール候補天体は、私たちから遠くにあり、非常にコンパクトなため、普通の望遠鏡ではその構造を捉えることはできません。イベントホライズンテレスコープ (EHT) では、VLBI (超長基線干渉計) という手法を用いて世界中の望遠鏡を組み合わせ、地球サイズ、直径約 1 万 キロメートルの仮想的な望遠鏡をつくりあげました。

この地球サイズの望遠鏡をつかって、波長 1.3mm の観測を行い、初めて、ブラックホール近傍の撮影ができるほどの視力を実現しました。これはちょうど地球から月の上にある 8cm のドーナツの構造が見えるくらいの視力に相当します。

2017 年の EHT 観測として座 A*

2017 年の EHT 観測では世界の 6 箇所、8 局の望遠鏡を使った VLBI 観測を実現し (図 2)、特に 2 つの巨大ブラックホールに注目していました。一つは、2019 年に報告された楕円銀河 M87 の中心巨大ブラックホール、そしてもう一つは本日のテーマである、いて座 A* です。この 2 つの天体がブラックホールだった場合、ブラックホールシャドウのリング構造は EHT 観測で十分捉えることができると予測されていたため、特に注目されていました。

いて座 A* の撮影にはその天体の持つ固有の特徴がさらなる課題として立ちふさがりました。そのなかでも最も大きな課題は、時間変化でした。EHT の観測時間、つまり撮影の露光時間が、10 時間程度なのに対し、いて座 A* は、数分間に目まぐるしく変化するため、撮影は容易ではありませんでした。そ

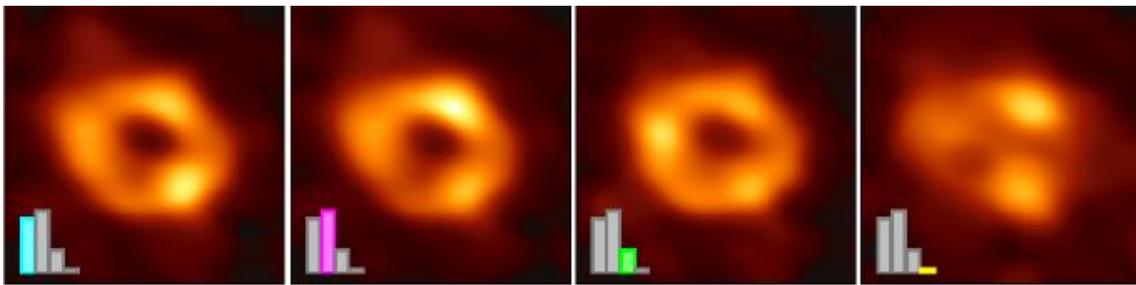


図 3: いて座 A*の異なる特徴をもつ 4 つのカテゴリ。左下の棒グラフはそれぞれのカテゴリの画像の枚数に対応する。

のため、EHT では、この変化から時間方向に平均された構造をとらえるための技術開発が必須となりました。その技術は、扇風機の羽の一枚一枚を撮影するのではなく、扇風機の羽が回っている状態を、撮影することに対応します。私たちは 2017 年から約 5 年をかけて、この課題解決をはじめとした技術開発と画像化の入念な検証を行いました。

パラメータサーベイ

EHT で用いられた、世界の望遠鏡をむすんで構成された地球サイズの仮想的な望遠鏡は、地球全体を覆っているわけではなく、抜けた部分を持つため、得られるデータは完全なものではありません。完全ではないデータを補う中でも信頼性の高い画像を得るために、合計約 20 万通りの画像化手法から約 1 万通りの方法まで選りすぐり、全ての画像の特徴を調べました。これらの画像を平均することによって、1 万通りの画像の中から共通した構造を検出したものが、いて座 A*の代表画像 (図 1)として世界各国で報道されました。

リングかどうかの議論

選ばれた画像は、大まかに共通した特徴が見える一方で、全く同じ特徴を持つわけではなく、おおまかに 4 つのカテゴリに分類できることがわかりました。4 つのカテゴリのうち、大多数の画像 (約 97%)は 3 つのリングカテゴリに分類され、リング上での最も明るい部分は異なるものの、同様のリングサイズをもっていました。EHT では、非常に少数の明確なリング構造のない画像 (約 3%)も、観測データを説明できる一方で、観測データと理論シミュレーションに基づく膨大なテストによって、いて座 A*がシャドウの特徴である、リングの構造を持つ可能性が極めて高いことがわかりました。これはブラックホールシャドウの特徴をとらえ、私たちの住む天の川銀河の中心に巨大ブラックホールが存在することを視覚的に示しています。

画像からわかること

さらに、リングの直径は約 6000 万キロメートルであり、アインシュタインの一般相対性理論で予言されたブラックホールシャドウの大きさと一致することがわかりました。つまり巨大ブラックホールの中で最軽量 (いて座 A*: 太陽の 4 百万倍)から最重量(M87 巨大ブラックホール: 65 億倍)という非常に広い質量の範囲にわたって、一般相対論が成り立つことが明らかとなりました。私自身、いて座 A*の撮影の課題がひとつずつ改善されていく様子を約 4 年間にわたり味わいながら、最終的にその姿を明らかにできた時の感動は、言葉では表せません。

将来の展望

いて座 A*のごく近傍の観測データが得られたことで、ブラックホール研究の新たな時代が幕を開け、EHTのさらなる発展とともに新たな研究の可能性が広がると期待されます。今回用いられた8局の望遠鏡に加え、2018年にはグリーンランドの望遠鏡、2021年と2022年の観測には米国とフランスの望遠鏡がEHTの観測に新たに加わり、合計11局の望遠鏡による高精度の撮影が可能となりました。

また観測の発展と同時に、ブラックホールごく近傍を動画として撮影する試みも精力的に進められています。これにより、ブラックホールが周囲の物質を飲み込む様や、ブラックホールとともに成長する銀河の形成や進化の解明に迫ることができると期待されます。また、ブラックホールごく近傍の動画の解析によって一般相対性理論からのズレを精度よく検証できるでしょう。その結果を手掛かりに、新しい理論を開拓できれば、私たちの普段の生活にも大きな貢献を及ぼす発見が生まれるかもしれません。

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本NEWSに関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.uss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507号室

編集人：今井慶悟(宇宙ユニット RA)

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: uss@kwasan.kyoto-u.ac.jp

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2022年8月号



宇宙倫理学教育プログラムの受講生を紹介します！

先月号に引き続き受講生紹介の第二弾です！今回は一般コースとして参加されてる福岡浩二さんに自己紹介文を寄稿していただきました！

福岡浩二 さん（一般コース）

私はこの春から、宇宙倫理学教育プログラムの一般コースとして参加しています。幼いころから宇宙が好きで、修士まで天文学を研究し、現在は企業向けソフトウェアを提供する欧州企業で事業開発の役割を担っています。開発のなかには、日本の宇宙関連事業との協業も含まれており、例えばあるプラント内での活動計画とその周辺の天災リスクを衛星データから解析し、有事におけるリスク管理を行います。こういったケースは増えており、特に衛星データ解析を使った既存産業の改善（または改革）はこれからも進んでいくことが予想されます。また、個人としての生活環境も変わりました。宇宙港として認定された大分県に今年より移り住み、一般社団法人のなかで「宇宙を通じた地方創生活動」をスタートしました。単に県民への宇宙の関心を高めるだけでなく、産業・社会における課題への解決も目指した地方における新しいロールモデルになれることを目指しています。今までは、幼いころからの夢の延長で純粋に宇宙に関する活動に関わり、今でもそれが原動力です。ただ、今は産業や軍事とも連関した宇宙への国家間競争が過熱していくなかで、一抹の不安を感じはじめています。それは、「宇宙活動における人類共通の規範が曖昧であること」です。そのような背景で本プログラムに共鳴し参加を決め、今は社会課題としても認知されている「宇宙デブリへの倫理規範」を研究テーマにしています。あくまで実社会を意識しながら、今後起こりうる未来を思い浮かべつつ、多彩なバックグラウンドを持つ方々との議論を楽しんでいます。



今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
秋ごろ（詳細は決まり次第 HP に掲載いたします）	第 6 回宇宙学セミナー 講師：寺園淳也 氏（ムーン・アンド・プラネッツ） 題名：決まり次第 HP に掲載いたします	Zoom によるオンライン開催です。準備ができ次第、HP に掲載いたします。

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.uss.kyoto-u.ac.jp/seminar/>) で公開いたします。

大気生物学者として宇宙生物学に挑戦する

三木 健司

京都大学大学院総合生存学館

私たちは現在、花粉や孢子、微生物などの生物由来の粒子である生物粒子について研究する学問分野である大気生物学（aerobiology）に取り組んでおります。中でも特に、エアロゾル物理学の理論を生物粒子へ適用することで、生物粒子の飛散動態を解析することを専門としています。

今回はこれらの研究の中でも、現在研究代表者として重点的に取り組んでいる、成層圏生物粒子の研究についてご紹介いたします。

大気生物学と宇宙生物学が交錯する成層圏

宇宙生物学の分野で最も重要な仮説の一つに、Panspermia 説というのがあります。この説は、地球の生物の元（例えば原始的な DNA など）は宇宙のどこかで生まれて、その後この生物の繁栄にとって都合の良い地球にたどり着くことで現在の地球上での繁栄を見せているのではないかとする説です。この Panspermia 説は一見すると“とんでも理論”に見え、今のところあまり広くは認められていません。しかし、その反対の現象、つまり、地球ですでに十分繁栄を見せている微生物などが宇宙の別の星に移動し、その星で独自の生態系を築いているという可能性は十分に議論する必要があります。このいわば『逆 Panspermia』が引き起こされるにはいくつかの条件が必要です。一つは微生物粒子を宇宙空間まで放出させるような十分な運動量を与えうる現象が起きることです。今のところ、例えば恐竜の絶滅を引き起こした隕石の衝突などがこれに当たるのではないかとされています。もう一つは、宇宙空間や他の惑星

の環境でも活性を保つか、繁殖が可能であることです。例え宇宙空間を漂い他の惑星に到着しても、死んでしまっているのは逆 Panspermia は起こりません。以上 2 つの条件を満たしたとき、地球で生まれた生命は他の惑星においても繁殖している可能性が出てくるわけですが、このような条件が重なることは非常に稀であるように思われます。しかし、最近の研究により、この逆 Panspermia が引き起こされる確率は、想定されているよりもずっと高いかもしれない可能性が出てきています。その理由は、微生物の存在範囲の広がりにあります。1930 年代に微生物は上空数十キロメートルまで存在範囲を広げているのではないかとする議論が始まります^[1]。その後、1978 年には当時のソ連の研究者が最高高度約 80km において微生物と思える痕跡を発見しました^[2]。これらの報告は微生物のコンタミネーション（混入）なく純粹に成層圏に存在した微生物を捉えたものであるかは今となっては確認することはできませんが、その後の世界各国の調査により、確かに上空約 15km から約 80km ほどの中層大気には微生物がいることが確定されつつあります。もし微生物が宇宙空間近傍の中層大気にまで存在しているのであれば、隕石衝突のような天文的イベントが起きなくとも、微生物が地球を脱出している可能性が高まります。また、成層圏はおおよそ-50℃、1/100 気圧であり、有害な UV-C（高エネルギー紫外線）に曝露されるといふ、生物にとっては過酷な環境ですが、最近の研究により、黒カビの一部などはこの成層圏の数時間の曝露を生き抜くことが分かってきています^[3]。この成層圏環境は実は火星の環境に似ているため、成層圏で生き抜けることは火星において繁殖可能である可能性をも示しており、地球の微生物の一部は他の惑星でも生き抜けるのではないかと考えられています。

以上のように、地球大気である成層圏に存在する生物粒子を見ることは、宇宙生物学的発展につながることに注目し、私たちの研究グループは大気生物学的観点から宇宙への生物の広がりを解明する研究に取り組んでいます。

理論と実験の独自発展を目指して

上述のように、宇宙空間に地球の生き物が進出しているのかを解明するため、成層圏における微生物の動態を調べる研究がこれまで為されてきています。しかし、これらの研究結果にはいくつかの大きな疑問点が残ります。まず一つは、どのようにして成層圏にまで微生物が運搬されているのかという点です。成層圏では上空に行くにしたがって保温効果を持つオゾンが増えるため気温が上がります。このことから、上に行くほど空気密度が低くなるため、成層圏では強い対流が存在せず、鉛直方向の空気の動きは非常に弱いのです。このため、微生物粒子のような数 μm もある粒子が上空数十キロまで上昇するにはなにか特別な力がかかっている必要があります。現在でもこの力は一体何なのかはわかっていませんが、この力が何かを解明することで、微生物が成層圏にまで運搬される現象がどの程度稀であるのかを解明することに繋がると考えられます。次に、成層圏環境に耐える生物の特徴とは何かという点です。先行研究でも成層圏環境に耐えた微生物と耐えられなかった微生物が存在することが示されていますが、DNA を破壊する紫外線や宇宙線が激しく降り注ぐ宇宙空間では、どのような特徴を持った生物であれば生き残ることが出来るのでしょうか。これを明らかにすることで、地球から他の惑星に移住している可能性がある微生物の特定に繋がると同時に、他の惑星で生まれた微生物の生物学的特徴の特定にも繋がる可能性があります。私たちの研究グループは、東京工業大学地球生命研究所の極限環境ウイルスの専門家、徳島大学の成層圏実験の専門家、岐阜県のものづくりメーカー（株）GOCCO。

(<https://gocco.co.jp/>) と共同チームを作り、これら 2 つの問題を理論的アプローチと実験的アプローチに取り組むことで解明しようとしています (図 1)。

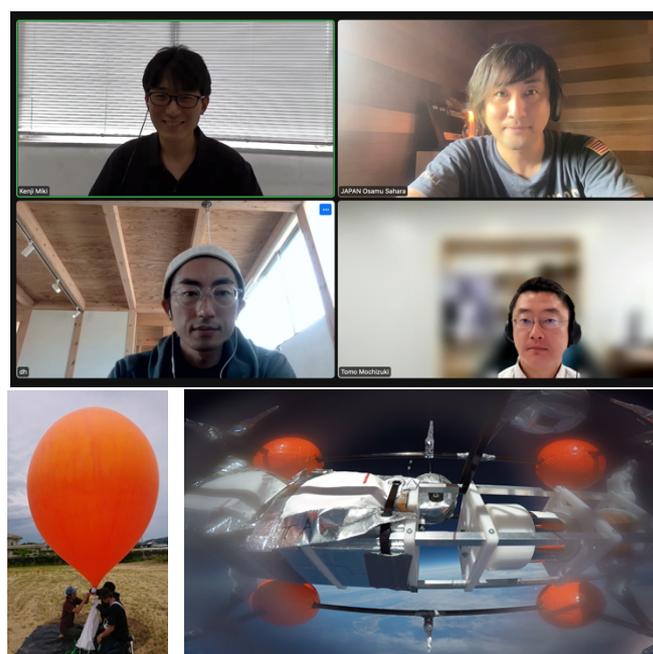


図 1 実験メンバー (上)
バルーン打ち上げ時 (左下) 成層圏に打ちあがった装置の様子 (右下)

理論的アプローチとしては、先行研究で議論されてきている成層圏において粒子にかかり得る力 (例えば太陽光泳動や雷雲による電気的力など) を各高度ごと、各環境ごとに計算し、どのような条件下で粒子を成層圏上部にまで運搬する力が生じ得るのかをシミュレーションから計算しています。また、中層大気上部にまで粒子が運搬された場合、宇宙線の影響はどの程度生物の活性維持にとって重大な影響を及ぼすのかを日本原子力研究開発機構が開発した PHITS コードなどを用いた計算で解明しようとしています。

実験的アプローチとしては、私たちは独自にゴムバルーンによる成層圏への微生物曝露実験のセットアップを構築し、様々な特徴の微生物を成層圏に打ち上げることで微生物の成層圏環境への耐性を調べています。特に、私たちのグループは極限環境の古細菌に着目した実験を行っています。地球上の生物は、主に 3 つのドメインに分けられます。もっとも原初的な生物である真性細菌、私たち人類を含め細胞核を持つ真核生物、そして原初的でありながら真性細菌に比べて真核生物に近い、私たちが注目している古細菌の 3 つです。古細菌はあらゆる極限環境に住んでいることが特徴的で、熱水や強酸環境の中から見つかることもしばしばあります。なぜ古細菌はこのような極限環境で生きられるのかはまだ分かっていません。私たちはこの極限環境を生き抜く古細菌などを成層圏に打ち上げ、その活性や形態を詳しく調べることで、DNA レベルで地球生物の成層圏環境での耐性の有無を決定する要素を特定しようとしています。また、私たちの本研究は、JAXA の大気球プロジェクトの実験としても採択されており、JAXA が所有する成層圏まで上昇する気球を用いた実験 (ExVISTA プロジェクト) の実施を今年度より行っています (図 2)。この JAXA の気球と私たちの研究チームが所有するゴムバルーンでは成層圏滞在時間や飛行経路が異なるため、成層圏環境への曝露条件の物理的違いが生む生物的影響の

違いを解明することに繋がることが期待されます。本プロジェクトは本格的に立ち上がってまだ3年目ですが、世界で初めてウイルスの成層圏環境曝露実験の結果を公表するなど、大きな進展を見せています。今後とも、本研究グループへの温かいご支援を賜れますと幸いです。

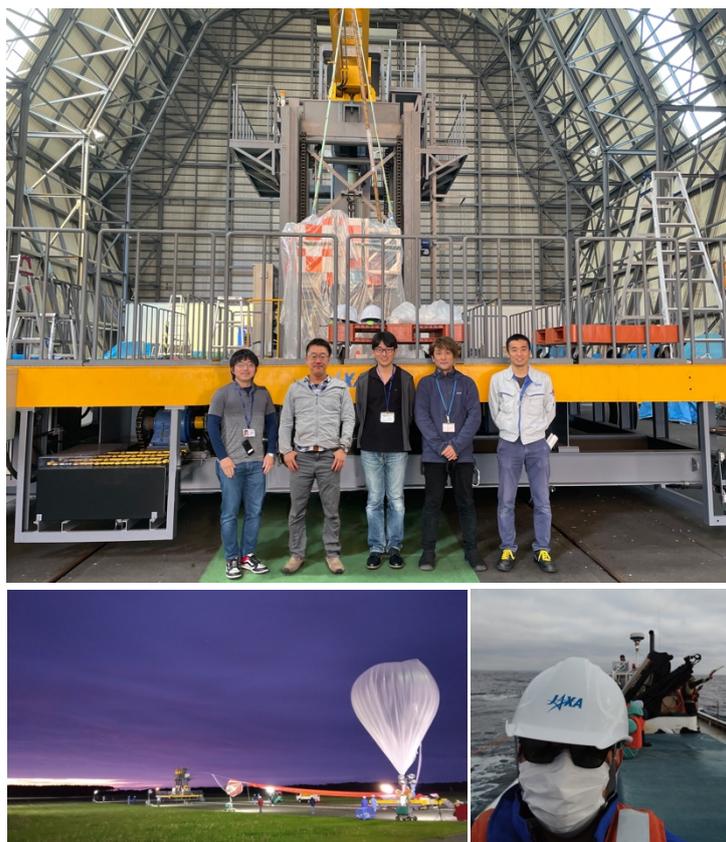


図2 JAXA 大気球を用いた ExVISTA プロジェクトメンバーと実験ゴンドラ (上)
JAXA 大気球による打上げの様子 (左下)
サンプル着水後早朝の極寒の海へ回収へ向かう顔 (右下)

参照文献

- [1] Rogers, L.A. and Meier F.C., National Geographic Society, Technical Papers. 146-151 (1936)
- [2] Imshenetsky, A.A., Lysenko, S.V., and Kazakov, G.A., Upper boundary of the biosphere, Appl. Environ. Microbiol., 35, 1-5 (1978)
- [3] Cortesão, M., Siems, K., Koch, S., Beblo-Vranesevic, K., Rabbow, E., Berger, T., Lane, M., James, L., Johnson, P., Waters, S.M., Verma, S.D., Smith, D.J., Moeller, R., MARSBOx: Fungal and bacterial endurance from a balloon-flown analog mission in the stratosphere, Front. Microbiol., 22 (2022)

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507 号室

編集人：名越俊平（宇宙ユニット RA）

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2022年9月号



宇宙倫理学教育プログラム・前期の活動が終了しました！

宇宙倫理学教育プログラム（SEEP）が始まって最初の学期が終了しました。受講者たちは、ゼミに所属して自らの研究を進めながら、複数の必修科目と選択科目を受講して知識を広げています。以下、宇宙倫理学の入門講義とゼミについて、前期の様子を報告します。

まず、文学部の講義として SEEP 受講者以外も受けられるかたちで開講した「宇宙倫理学入門」ですが、予想以上に多くの履修希望があったため、教室を当初予定していたものより大きな部屋に変更して実施することとなりました。文学部の学部生を中心としつつも、理学部等の他学部生や大学院生を含む多様な参加者が席を並べる学際的な場となっていたのも印象的です。この講義では、最初に準備として倫理学理論と宇宙開発史の基礎知識について解説し、その後、宇宙倫理学のトピックを毎回 1 つずつ扱っていきました。最終的に提出された期末レポートは 43 件で、高水準な力作が多く、受講者たちの関心とレベルの高さがうかがわれました。

SEEP のために宇宙ユニットが独自に設置した「宇宙倫理学ゼミ」では、プログラム受講者 13 名が毎週集まり、それぞれの専門と関心に基づいた研究の進捗発表を行いました。今年度の受講者は、学内から学部生と大学院生が 5 名ずつ、学外から 3 名という構成ですが、まったく異なる知的背景を持つメンバーが集まったことで、毎回多様性に富んだ議論が交わされています。宇宙倫理学という新しい分野に挑戦する場であるため、ゼミ開始時にはいずれの受講者も初学者として手探りの段階から研究を始めることとなりましたが、それぞれの分野で豊富な経験と知識を持つ社会人受講者や大学院生のリードによって、さっそく興味深い発表とディスカッションが行われています。学部生も積極的に知識を広げながら、獲得しつつある各自の専門性を活かした研究を進めています。

後期（2022年10月～）は、「宇宙倫理学入門」に代わり「宇宙倫理学演習」が開講され、専門的な英語文献の読解と批判的ディスカッションの技法を学びます。「宇宙倫理学ゼミ」は通年開講で後期も継続します。前期で得た知識と経験をもとに、どのような発表や議論が行われるのか、今からとても楽しみです。

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
9月20日 午後3時～ ※スケジュール変更の可能性があるので、Webでご確認ください。	第6回宇宙学セミナー 講師：寺園淳也氏（ムーン・アンド・プラネット） 題名：（仮題） 「世界と日本の月探査・最新情報」	Zoomによるオンライン開催です。準備ができ次第、HPに掲載いたします。

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/seminar/>) で公開いたします。

巨大天体衝突で天王星の衛星を作る！

佐々木 貴教

京都大学 宇宙物理学教室

天王星は太陽系の8惑星の中では一見マイナーな存在ですが、他の惑星と比べて非常に特異な姿をしており、研究者にとっては挑戦しがいのある魅力的な天体です。この天王星、およびその周りの衛星系の形成メカニズムについて、ここ数年で大きな研究の進展がありましたので、本稿ではその概要について紆余曲折の議論の過程も含めて簡単に紹介します。

「起」：太陽の周りを横倒して回る天王星系

天王星の最大の特徴は、衛星も含めた天王星系全体が公転軌道面に対し98度傾いた状態（つまりほぼ「横倒し」）で太陽の周りを回っていることです。巨大惑星が形成される過程では、自転軸は0度（つまり「直立」）に近い状態で成長することが期待されるため、天王星の自転軸を傾けるためには何か大きなイベントが必要となります。そこで先行研究で提案されてきたのが、天王星への巨大天体衝突（ジャイアントインパクト）です。

巨大天体衝突といえば地球の月の形成仮説として有名ですが、天王星が形成された環境においても天体同士の衝突が起こっていた可能性は高いと考えられています。90年代はじめ頃には天王星への巨大天体衝突の数値シミュレーションが行われ、地球サイズの天体が斜めに衝突することで実際に天王星の自転軸の傾きが説明できることが示されてきました。

「承」：巨大天体衝突で天王星の衛星は作れるか？

天王星への巨大天体衝突が起こると、天王星が横倒しになると同時に、赤道面付近に衝突によって生じた破片が円盤状にばらまかれることが予想されます。2010年代後半になると数値シミュレーションの解像度が大幅に上がり、この衝突破片の分布や量が計算によって求められるようになりました。その結果、

この衝突破片が重力で集まって大きくなることで、現在の天王星衛星系が形成される可能性があることがわかってきました（図1）。

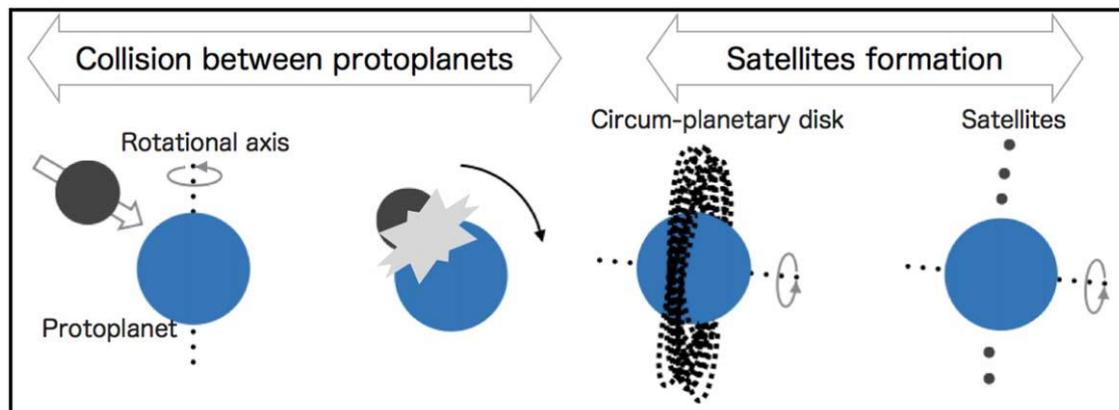


図1. 巨大天体衝突による天王星衛星形成の概念図。(Ishizawa et al., 2019)

原始惑星(protoplanet)同士の衝突により自転軸(rotation axis)が傾き、傾いた自転軸の周りに周惑星円盤(circum-planetary disk)がつかられ、その中で惑星が形成される。

そこで我々は、大量の天体同士の重力相互作用の計算を行う「N体計算」を用いて、衝突破片の集積による衛星形成過程に関する数値シミュレーションを行いました。しかし、残念ながら現在の天王星衛星系の特徴である「天王星から離れるほど衛星のサイズが大きくなる」という特徴を再現することはできませんでした。巨大天体衝突直後の破片分布をもとにN体計算の初期条件を作成したところ、天王星の近くほど破片の量が多く、より大きな衛星が形成されることになってしまったのです（Ishizawa et al., 2019）。

「転」：天王星周囲に形成された円盤は進化する！

これにて巨大天体衝突による天王星衛星形成の夢はついでたかに見えましたが、ここで我々はある重要な点を見落としていたことに気づきます。巨大天体衝突で天王星の周囲にばらまかれる「破片」は、もともと氷成分が主であるため、衝突直後にはほぼ全てが蒸発しているという点です。つまり、初期に天王星周囲に形成される円盤は氷破片からなる固体の円盤ではなく、水蒸気からなるガスの円盤なのです。円盤の温度が下がれば、いずれ水蒸気は凝縮して氷に戻りますが、その前にガス円盤が進化する可能性があります。

そこで、ガス円盤の拡散・冷却・凝縮過程を詳しく調べてみたところ、以下のような進化過程をたどることがわかりました（図2）。

- ① 巨大天体衝突直後に形成されるガス円盤は、非常に高温で質量も大きく、天王星から遠ざかるに従って密度が下がる分布をしている。
- ② ガス円盤は速やかに拡散し、内側で天王星に降着して質量を減らす一方、外側への拡散によって円盤の半径が広がっていく。外側の円盤ガスが薄い領域から先に温度が下がり、外側から氷が凝縮し始める。
- ③ 円盤ガスは引き続き拡散・降着により質量を減らしながら、外側から順に氷が凝縮していく。これにより、後から凝縮する領域ほど円盤の密度が小さくなった状態で氷円盤に変わることになる。

- ④ 最終的に形成される氷の固体円盤は、初期のガス円盤とは逆に、天王星から遠ざかるに従って密度が上がる分布となる。

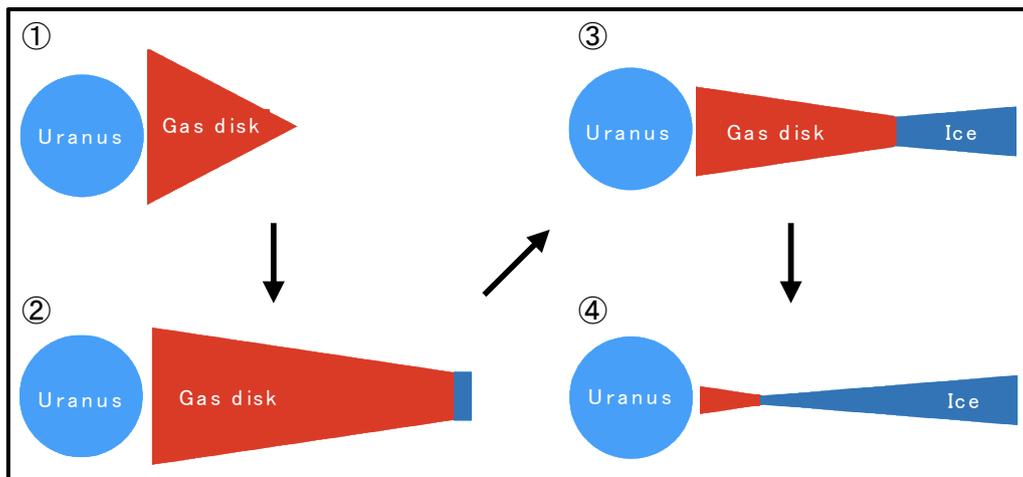


図 2. 巨大天体衝突後の円盤進化の概念図。

以上のとおり、巨大天体衝突によって天王星周囲に形成されたガス円盤は、熱力学的な過程を経て、全く逆の密度分布を持った氷円盤へと進化することがわかったのです (Ida et al., 2020)。

「結」(?) : 新しい天王星衛星形成シナリオ

さて、それでは天王星衛星の形成に再チャレンジです。円盤進化過程も考慮した初期条件のもとで、再び N 体計算によって衛星形成過程のシミュレーションを行いました。その結果、天王星衛星系の特徴である「天王星から離れるほど衛星のサイズが大きくなる」点を見事に再現することに成功しました (図 3)。

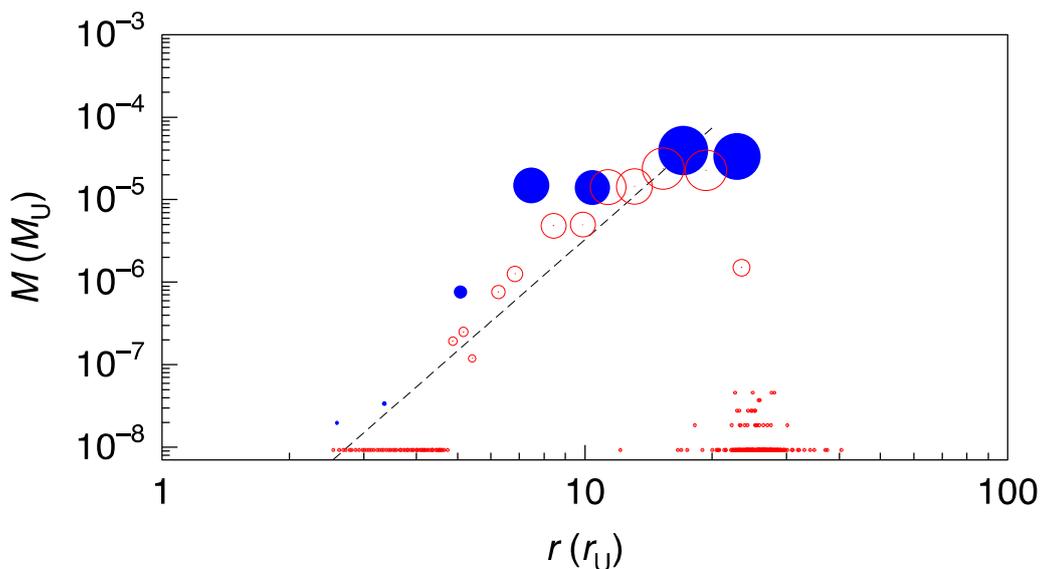


図 3. シミュレーション結果 (赤丸) と実際の天王星衛星 (青丸) の分布図。横軸は天王星からの距離、縦軸は衛星の質量。それぞれ天王星の半径・質量で規格化して示してある。(Ida et al., 2020)

ただし、この論文の中では N 体計算は 1 例のみしか行わなかったため、本シナリオの信頼度をより高めるためには、複数回の N 体計算を行って統計的な結果を示す必要がありました。そこで最後の詰めとして、想定される巨大天体衝突の物理条件の範囲内で、大量の N 体計算を行ってその結果を解析しました。これにより、新しい天王星衛星形成シナリオが完成する・・・はずでした。

しかし、宇宙はやはりそんなに甘くはありませんね。計算結果を解析したところ、天王星衛星系の大まかな特徴は再現できることが確認されたものの、その一方で新たな問題点がいくつも浮かび上がってきたのです。ここでは詳細は割愛しますが、これらの問題点の指摘とその解決案の提示について、論文としてまとめたものを現在投稿中です (Kihara et al., submitted)。

以上、天王星系の研究に関するここ数年間の一喜一憂をご紹介させていただきました。天王星とその衛星の起源解明への挑戦は、これからもまだまだ続きます。今後のさらなる研究の進展に、どうぞご期待ください。

参考論文：

- ・Yuya Ishizawa, Takanori Sasaki & Natsuki Hosono, Can the Uranian Satellites Form from a Debris Disk Generated by a Giant Impact?, *Astrophysical Journal* **885**, 132(10pp) (2019)
- ・Shigeru Ida, Shoji Ueta, Takanori Sasaki & Yuya Ishizawa, Uranian satellite formation by evolution of a water vapour disk generated by a giant impact, *Nature Astronomy* **4**, 880-885 (2020)
- ・Yodai Kihara, Takanori Sasaki & Shigeru Ida, N-body simulations of the formation process of Uranian satellites (submitted)

ホームページ：

Sasaki Takanori Online (<http://sasakitakanori.com>)

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆さんのご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507 号室

編集人：今井 慶悟 (宇宙ユニット RA)

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2022年10月号



宇宙倫理学教育プログラムの受講生を紹介します！

8月号に引き続き受講生紹介の第3弾です！今回は一般コースとして参加されてる中島浩彰さんに自己紹介文を寄稿していただきました！

中島浩彰さん（一般コース）

中島浩彰（なかじまひろあき）、真宗大谷派小野山 浄慶寺（じょうきょうじ）住職をしています。今年の4月より宇宙倫理学教育プログラムの一般コースを受講させていただいています。私自身ど素人のただの宇宙好きの坊さんで、なんの知識もありませんし倫理学も全く学んだこともありませんでした。幼児期に父がガンで入院し、病院が家のように。夜、病院の屋上で星空を眺めるなか吸い込まれるような感覚と星の瞬きにあやうさを感じ、あの星が消えたら父も亡くなるのではないかと不安に感じたことを今も覚えています。また、思春期にフェリーで沖縄に行く機会があり、真夜中、太平洋の真ん中で甲板の上に寝そべて、真っ暗な海と星明かりだけの世界、全面が天の川と見まがうような宇宙をみて、ブラックホールはあるのか？あの先はどうなっているのか？と空想を巡らしたり不安に思ったり、自分



（人間）の小ささに諦めと安堵を感じたりしていました。そんなこんなで関心はあるものの天文学者や宇宙工学を身につけるまでの学力と忍耐を持ち合わせてはいませんでした。2010年に磯部洋明氏に声をかけて頂き『お寺で宇宙学』を開催させて頂くはこびとなりました。『お寺で宇宙学』では宇宙に関心のある様々な科学者・研究者の方から前半お話を伺い、後半は僧侶が仏教の話をする。全く違う分野であるのに共通するところが見えたり、新たな発見がありました。会の最後は座談の時間を設けて、参加者の方から色々な質問や話を伺う事も出来、宇宙だけお寺だけでは知り合えなかった人達に宇宙と仏

教の関心を深めて頂く大変貴重な機会を頂きました。この事を通じ、異分野とのシナジー効果を実感していました。

この春からの宇宙倫理学、面白そうと直感で感じてはいたものの「仏教は真理を説くが、倫理を説かない」と言われる倫理をどの様に受け止めることが出来るだろうかと不安もありました。しかし、半年間の学びの中で倫理と倫理学の違いを知り、倫理学となった場合は自分の主張にエビデンスと客観的論証を持って論じなければならないということを知りました。このことは私にとってこの前期での最大の成果です。仏教では説かないと言われる「倫理」ではなく、私の専門的視点からみた主張を客観的に論ずる「倫理学」でしたら私にもできると思いました。実際ゼミに参加する学部生や院生も様々な専攻をされており、それぞれの専攻分野からの発表を聞くことはいつも刺激的です。

そのような中、まったく白紙の状態で参考文献を読み進めていくと倫理の中身にはキリスト教の香りがプンプンして違和感を覚えざるを得ませんでした。これを仏教的に再構築出来ないかと初回の発表の時には思っていましたが、私が扱うにはデカすぎる課題だと指摘され、その後様々な倫理学に触れていくうちに、それは確かに自分の無知さ故の発言だったと納得できました。今は僧侶である私の視点から宇宙での人の生死について様々な角度から倫理的問題を考えてみようと思っています。宇宙で生きていくことは勿論、人が地球を離れて宇宙で死を迎えるということがやがて来る時代、宇宙で暮らす人、宇宙空間で滞在する人たちにとって、その場で亡くなった人やその人の死後の扱いをどうするべきか、地球にいる私たちが地上から考える死としては問題にならなかったことが問題となり得るように感じ始めています。

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
11月25日 (金) (予定) 15:00 16:30	第7回宇宙学セミナー 講師：前田 啓一 氏 (京都大学 理学研究科宇宙物理学教室 准教授) 題目：(仮) カシオペア超新星残骸に刻まれた 爆発機構の痕跡	Zoom によるオンライン開催です。準備 ができ次第、HP に掲載いたします。

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.uss.kyoto-u.ac.jp/seminar/>) で公開いたします。

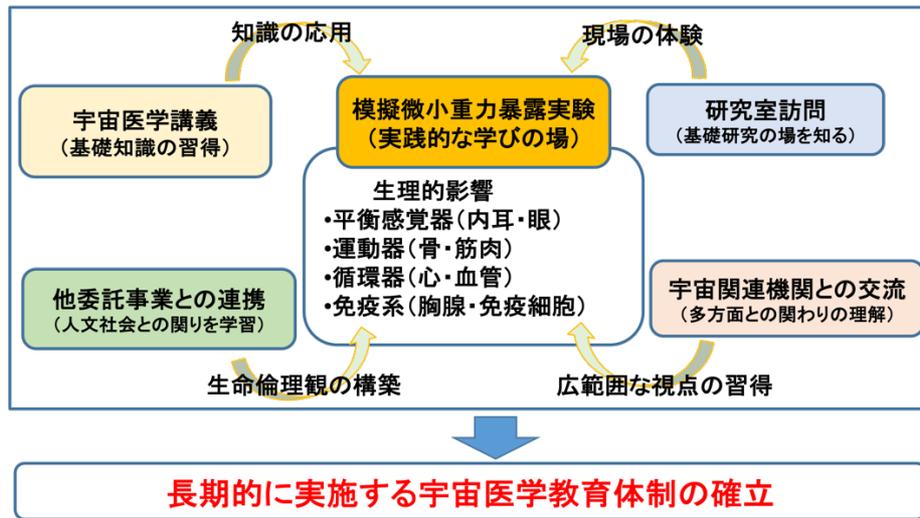
令和 4 年度宇宙航空科学技術推進委託費(宇宙医学)の 採択ならびにプログラム開始のお知らせ

今年度、課題名「将来の有人宇宙活動を支える宇宙医学人材育成プログラムの創出」として宇宙医学分野の発展に寄与する人材育成を行うことを目的に、文部科学省委託費事業・宇宙航空科学技術推進委託費・宇宙航空人材育成プログラムに応募し、採択されたことを報告いたします（実施期間 R4-6 年度）。この委託事業では宇宙医学教育プログラムを構築し、その中には、宇宙医学に特化した講義ならびに実習を盛り込んでおります。第一弾の講義としては、事項に報告するように、京都大学の後期授業として開始しております。また、実習については宇宙医学関連の研究室訪問や模擬微小重力暴露実験などの実践的に学べる場を提供していく予定です。益々ヒトが宇宙に進出していく時代が近づくにつれ、宇宙環境によってヒトの体にどのような影響があるのか、またそれをどのように対処していくのかを学ぶことは、宇宙医学分野だけでなく、宇宙開発全般に於いても重要な要素だと考えています。宇宙医学に興味のある方は、ぜひこのプログラムに参加してみてください。具体的な実習参加者の募集情報などは、随時宇宙ユニットの HP に掲載する予定ですので、よろしくお願い致します。下記に、本提案内容の概要を記載いたします。

＜課題の概要＞

将来の有人宇宙活動へ貢献できる即戦力となる宇宙医学の専門知識を持った人材の育成を行う。現在、国際宇宙ステーションが有人宇宙活動の中心となっているが、今後はアルテミス計画など月面周回軌道上の宇宙飛行士の滞在や月面有人活動、その後の火星有人活動など人類の宇宙進出は益々活況となる。そのような中、宇宙滞在によって、人体に生じる生理的変化を正しく理解し、それに対してどのような対策を講じるかを考察できる人材を育成することは、有人宇宙活動の根幹を支えることとなる。そのため、これまで京都大学で実施してきた有人宇宙医学プログラムを発展させ、講義と実践的な実習（模擬微小重力暴露実験：ベッドレスト実験）を通じて、微小重力環境下での生理的影響を深く学ぶことができる教育プログラムへ発展させ、これを実施する。講義で学んだ知識を実践的に活用する機会として模擬微小重力暴露実験（ベッドレスト実験）を行い、被験者からデータを取得しそれを解析することによって、微小重力環境下で生じる人体への生理的影響について学び、その対策についても考察する。本事業を通じた成果は積極的に各アカデミアの年次大会で発表し、宇宙医学研究ならびに医学教育の啓蒙を行い、我が国の有人宇宙開発を支える宇宙医学分野の基盤を広げ、堅固なものとする。関連機関との連携を確立し、多くの学生に宇宙医学を学ぶ機会を提供し、事業終了後も継続できる体制を整備する。

宇宙医学教育研究プログラム



2022 年度大学院分野横断型講義「有人宇宙医学」 開講のお知らせ

宇宙医学教育プログラムの一環として、2022 年 10 月 5 日より大学院分野横断型講義「有人宇宙医学」が開始されました。講義の概要は下記の通りになります。オムニバス形式で、宇宙医学に関する様々なトピックをそれぞれの専門家の先生方に解説していただきます。多くの学生さんに宇宙医学の内容について理解していただく一助になればと思っています。

授業科目名：有人宇宙医学

対象学生：大学院生、学部生（聴講可）

曜日限：水曜日 4 限

場所：総合生存学館大講義室（2F）

概要・目的：人類の宇宙進出は、特に技術的発展に伴って益々活況となっている。人の宇宙滞在もスペースシャトルから国際宇宙ステーションに宇宙プログラムが移行して、益々長期化し、今後は月面ミッションや火星ミッションなどで数年単位の滞在も現実のものになっている。しかし、地球環境に適応して進化した我々人が、宇宙環境に滞在した際にどのような影響があるのかはすべて解明されているわけではない。そのため本講義では、今後の有人宇宙活動に向けて、人への宇宙滞在の影響がどのようなものであるかを学び、将来的にその対策方法の解明に従事する人材育成を目的とする。

授業計画：

【第 1 回】10 月 5 日 宇宙医学概要（寺田昌弘：京都大学）

【第 2 回】10 月 12 日 宇宙での姿勢制御（萩生翔大：京都大学）

【第 3 回】10 月 19 日 フライトサージャンの役割（嶋田和人：筑波航研、元 JAXA 医師）

【第 4 回】10 月 26 日 宇宙飛行とリハビリテーション（山田深：杏林大学）

【第 5 回】11 月 2 日 宇宙生物実験（暮地本宙己：東京慈恵会医科大学）

- 【第6回】11月9日 宇宙での骨格筋への影響①（河野史倫：松本大学）
【第7回】11月16日 宇宙での自律神経系への影響（岩瀬敏：愛知医科大学）
【第8回】11月30日 宇宙での骨格筋への影響②（志波直人：久留米大学）
【第9回】12月7日 宇宙酔い（野村泰之：日本大学）
【第10回】12月14日 宇宙服と減圧症（田中邦彦：岐阜医療科学大学）
【第11回】12月21日 宇宙での心循環系への影響（南沢享：東京慈恵会医科大学）
【第12回】12月28日 宇宙での骨格筋への影響③（谷端淳：東京慈恵会医科大学）
【第13回】1月11日 宇宙放射線の影響①（山敷庸亮：京都大学）
【第14回】1月18日 宇宙放射線の影響②（山敷庸亮：京都大学）

（文責：寺田昌弘）

NDL Ngram Viewer を使って天文学史で遊んでみる

玉澤春史

京都大学/京都市立芸術大学

はじめに

今回は国立国会図書館が2022年に公開した新たなサービス「NDL Ngram Viewer」を例にして、過去の資料から人々がどのように宇宙に関する用語をつかっているかを覗いてみることにしたいと思います。もちろん研究レベルで使用することも十分可能なのですが、ここではもうちょっと手前に、検索システムで遊んでもらってどのようなことができそうか、ということを考えるきっかけにさせていただければ幸いです。

1. 「いつから使われているのか」という問いの難しさ

天文学、宇宙科学に限らず、ある学問の分野に振れていることが他人に認識されると、分野の専門用語について、「その単語はいつから使われているのか」と聞かれることがあるかと思います。この質問、質問した本人が思っている以上に厄介な内容です。何が厄介なのかというと「使われている」というのが単純に誰がはじめて最初に使ったかだけでなく、個人の使用を超えて使うという内容を含みうるからです。さらに、専門家のなかで共通語として使われているのか、一般的な用語として流通したのか、という様々な意味をもちうらと思います。後半に提示した意味になると、言葉の流通をどのように調べるかということになります。

文章のなかでどのように使われているかを調べる、というのが一つの手ですが、例えば天文学、あるいは理科の教科書・専門書の中身を調べたりするには本の中身をすべチェックすることはどの程度可能でしょうか。本のタイトルだけであればすでに様々な検索が可能ですが、内容まで含めると実際に目を通す必要があります。一般への認識となるとその範囲はすべての分野の書物となり、実際に本を手にとって調べるとことはほぼ不可能です。とくに明治以降、活字印刷出版物が激増して以降はその困難さが容易に想像できると思います。一方で、活字印刷であれば、近世以前の「くずし字」を読むよりはある程度機

械的に読みやすいのでは、という推測も可能でしょう。困難であるがために、そのように様々な書籍の中身を横断的に語句検索できるようになれば様々なことが出来そうです。

2. NDL Ngram Viewer を使ってみる

近年では過去の様々な文字資料がデジタルテキスト化されて、様々な分野で研究に活用されています。今回は 2022 年に国立国会図書館が公開した「NDL Ngram Viewer」(<https://lab.ndl.go.jp/ngramviewer/>) を利用してみます。このサービスでは、国立国会図書館（NDL）が所有するもののうち、著作権保護期間の満了した図書資料全件（約 28 万点）を OCR（Optical Character Recognition/Reader：紙に書かれた文字を光学的な手法で読み取り）にかけてテキスト化したものを、全文検索の対象にしています。OCR テキストデータから集計した、約 8.3 億種類の単語及びフレーズを可視化するサービスが NDL Ngram Viewer です。

手始めに「銀河系」という言葉を検索してみましょう。「銀河」というのは現代では恒星の集団をさす一般名詞ですが、日本語としてのもともとの意味は夜空を見上げたときに川のように見える星のあつまりで、我々の住む地球、そして太陽が属している星の集団です。つまり「銀河」ももとは固有名詞ともいえるのですが、現代では「銀河系」、最近では「天の河銀河」という言い方で我々の属する銀河を示します。



図 1. NDL Ngram Viewer による「銀河系」の集録図書での出現頻度分布表示

図 1 は NDL Ngram Viewer で「銀河系」という単語を調べたものです。書面スキャン画像から自動的に単語を読み取ったものであり画像の質が悪いものなどは誤って認識されるものもあるため、最終的には個別の画面を開く必要があり、また自動認識で読み取れない場合もあるなどの注意点は必要であるが、それでも書名の検索ではなく中身の検索を広範にできるのは画期的です。

個別の使用例も確認できます。現在 NDL Ngram Viewer から確認できるもののうちで古いものを探すと、明治期の京都の俳人・中川四明 による「俳諧美学：平言俗語」が 1906 年とかなり初期に使用されていることがわかります。当然当時の天文学ですでに使用例があるはずですので、まだテキストデータベースに登録されていないものもありますのでこれが「最古」といえるわけではありませんが、例えばアレキス 著・一戸直蔵 訳の「宇宙発展論」が 1914 年、新城新蔵の「宇宙進化論」が 1916 年ということ考えると非常に早い使用例だということがわかるかと思います。

該当箇所を引用してみます（テキストデータもダウンロード可能）。

されば、高山の高高なるものあるも、一たひ念頭に地半径(地球の半径にして天體の距離を測るに尺度として用ふ)に思ひ到れば、忽ち高高たるを得ず、地半径よりも、更に大なる遊星系に及び、遊星系よりも更に大なる太陽系に及び、銀河系(銀河は大星團の棋子形をなせる證とするもの)に及び、此の如くにして果しなくば、高高も終にあり得可からじ。戯れに

餅搗やむしろの上の太陽系 四明 (154 ページ)

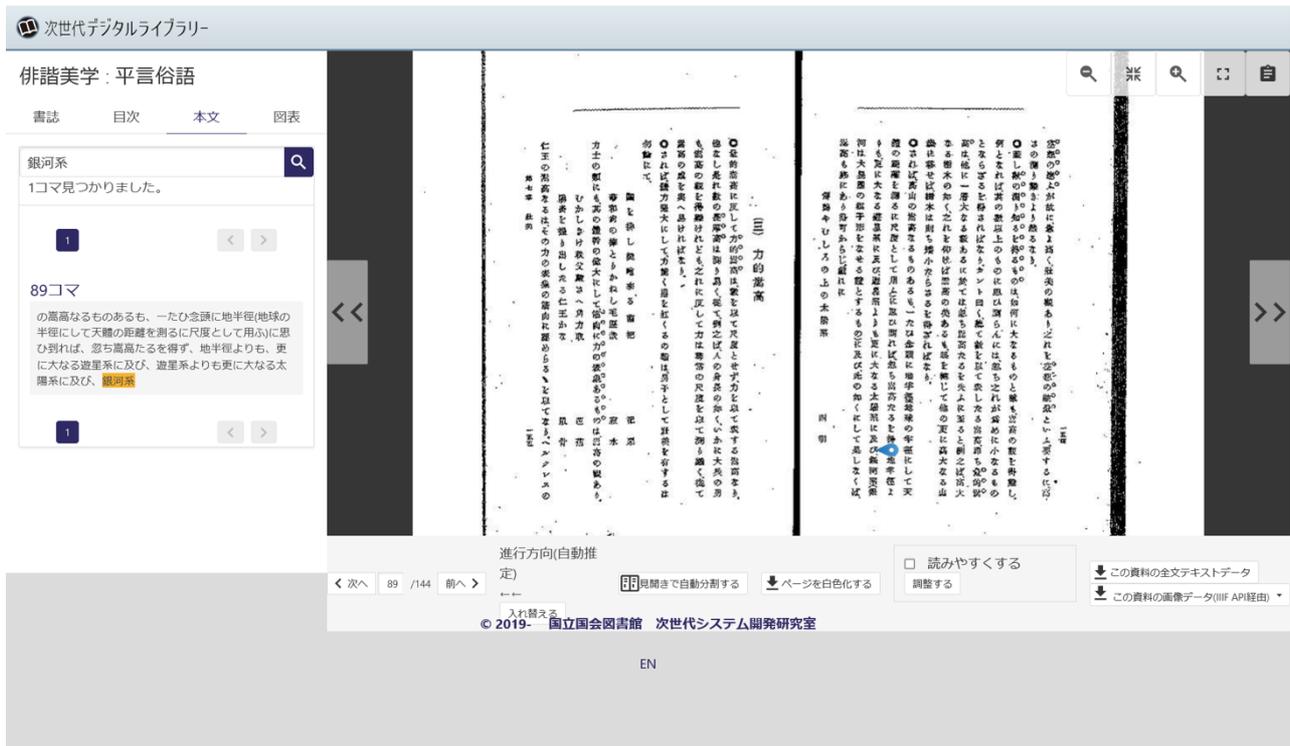


図2. NDL 次世代ライブラリーより「俳諧美学：平言俗語」表示画面：「銀河系」の表記がある箇所が示されてされている。

おそらく「太陽系」を俳諧に使った例でも最初期のものと思われる。

ただし、「銀河系」の言葉の使い方がこの時点で広く確定していたかについては他の書籍もみたほうがよさそうです。新城新蔵 (1916) 「宇宙進化論」から引用します。

兔に角こゝに主として講究しようと思ふ我が宇宙は有限であつて且つ其各部互に聯 關し、所謂銀河の方にひろく擴がれる扁平状の一團體である。依てこの宇宙を銀河系 (Milky Way System)と稱へる。(4 ページ)

"Each Sun with its family of planets forms a system of the first order. Our Sun belongs to a vast globular group or cluster of stars. forming a system of the second order The system of the second order, being ranged one behind the other to a great depth, forms by their concourse the Milky Way. Analogy

suggests that there are in the universe many Milky Ways, forming together a system of the fourth order; and so on. Lambert, 1761.

『太陽と遊星との一系は第一次のものである。かゝるものは幾らもあり、是等は更に尤大なる球状星團に屬する、是即ち第二次系である。第二次系は更に集まつて銀河系をなす。類推すれば宇宙には無数の銀河系があると思はれる、是等の銀河系は相集て共に第四次系をなす。以上同様にして次第に高次の宇宙系統に至る。』（115 ページ）

とくに後者の記述では、銀河系のような星の集まりはたくさんあることを意識してつがっていることがわかります（大文字表記で many Milky Ways としてはいますが）。他の箇所にも「我が銀河系」「他の銀河系」と使用しているところからみても、すんなりと「銀河系 = 太陽系が属している銀河」とこの時点で使われていたとはまだ断定しにくい可能性があることがわかります。

意味の部分とはともかく、とりあえず科学技術や天文学以外の書籍で「銀河系」という表記が使われている例を 1920 年代あたりまでピックアップすると以下の通りです（カッコ内は筆者の補足）。

佐藤惣之助 (1922)「荒野の娘：自然詞華集」
水野千里 (1922)「国定教科書『星の話』解説」（国語読本の解説）
村上貫達 (1923)「大聖釈迦」
宮沢賢治 (1924)「春と修羅」
犬養健 (1924)「南国：他三篇」（犬養毅三男）
帆足理一郎 (1925)「宗教哲学概論」
暁烏敏 (1927)「老境の黎明」（あけがらすはや：真言大谷派僧侶、俳人）

文学作品での利用のほか、宗教関係の著作でも使用が見られます。どのように世界を認識するか、という意味で宗教もまた宇宙を取り扱いますが、最新の宇宙に関する知識をどのように個別の宗教の内容に取り入れるか、もしくは取り入れないかという格闘が見て取れます。俳諧なども含めた詩での利用が早いのは、限られた範囲のなかで使用する語句を選ぶ際に最近の言葉からも探すというのがみてとれるのでしょうか。

3. おわりに

厳密に言えば出版物を調べたとしても、今度はその出版物が実際にどの程度、どの層にひろまったかということ調べる必要がありますが、まずはその前の「実際の記述を調べる」というのがかなりお手軽になったのは、近年のデジタルアーカイブの発展により古書の画像閲覧、そして NDL Ngram Viewer のようなテキスト検索ができるようになったからといえます。膨大なテキストをつかった研究はこれからさらに盛んになると思われますし、近代日本天文学史の研究にも当然寄与するものと考えられます。

参考

- ・ 中川四明（1906）「俳諧美学：平言俗語」博文館
- ・ 国立国会図書館, NDL Ngram Viewer, <https://lab.ndl.go.jp/ngramviewer/>（参照 2022-10-20）
- ・ 新城新蔵（1916）「宇宙進化論」丸善

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆さんのご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507 号室

編集人：高口和也（宇宙ユニット RA）

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp