

東京大学理学部

地球惑星 物理学科

The University of Tokyo
Earth & Planetary Physics

ち まどい もの ことわり
地の惑、物の理

地球・惑星・宇宙に思いを巡らし、物理で解明しよう

学生の皆さんへ

地球惑星物理学は、地球や惑星の上で生起する様々な現象を、物理的手法を用いて解明する学問分野です。

天気予報や緊急地震速報といった日常生活上のニーズを背景に、地球惑星物理学の対象は極めて多岐に渡っており、

太陽系や惑星の進化、宇宙空間での現象までを含んでいます。

近年では地球温暖化予測や深海探査、固体地球深部の探査、

宇宙における生命発生の探求など、

活躍の場は従来にもまして広がりつつあります。

人間活動のフロンティアを地球惑星物理学科でともに学びませんか？

無限の可能性と領域があります。

地球や太陽系は広大な宇宙の普遍的な存在なのでしょうか、それとも、特殊な存在なのでしょうか。

私たち生命が地球に誕生し、進化してきたことは必然だったのでしょうか、偶然だったのでしょうか。

「私たちはどこから来てどこへ向かうのか」

という人類の究極の問いへの答えを

地球惑星物理学は明らかにしようとしています。

CONTENTS

- 03 地球惑星物理学科の研究 [大気・海洋分野]
- 06 地球惑星物理学科の研究 [固体地球分野]
- 09 地球惑星物理学科の研究 [惑星・宇宙分野]
- 12 地球惑星物理学科の研究 [大規模数値シミュレーション]
- 13 地球惑星物理学科の教育 [カリキュラム・4年生演習]
- 15 学生生活・在学生からのメッセージ
- 17 卒業後の進路・卒業生からのメッセージ



惑星・宇宙

Planets & Space

太陽系には実に多様な惑星が存在しています。水をたたえ、生命を育む地球、赤い荒野が広がる火星、分厚いガスをまとった木星や土星。これらの惑星の個性は、46億年前の太陽系の誕生から現在までの個々の惑星の進化を反映しています。地球や太陽も宇宙の一部です。地球をとりまく宇宙空間とはどんなところなのでしょう。近年、発見数が増加している太陽系外の惑星にはどのような世界が広がっているのでしょうか。地球惑星物理学は地球や太陽系にとどまらず、宇宙の理解にまでつながる学問です。



大気・海洋

Atmosphere & Ocean

大気や海洋の中の地球規模の流れや複雑な乱れはどのように生じるのか、その変動を正確に予測するには何が必要なのか。大気と海洋の科学は、集中豪雨や早魃などの異常気象の母胎となる気候変動、温暖化や砂漠化に代表される気候変化、オゾンクライシスといった重大な環境問題に適切に対処するための基礎であり、その社会的使命はますます重要になっています。



固体地球

Solid Earth

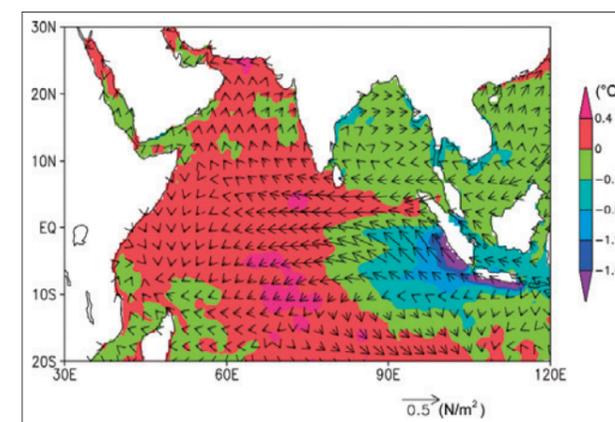
地球の内部はどのような物質で構成され、どのような構造を持ち、どのような運動をしているのか。大陸の移動や、時に甚大な被害をもたらす地震や火山の活動、方位磁針を北に向ける地球磁場の存在、これらはすべて生きている地球の一側面なのです。

研究トピック03

異常気象を引き起こす気候変動現象

世界各地に猛暑、冷夏、干ばつ、豪雨などの異常気象をもたらす気候変動現象が数多く存在することが明らかになっています。例えば、インド洋熱帯域には、東インド洋熱帯域の海面水温が平年よりも低くなり、西インド洋熱帯域の海面水温が平年よりも暖くなる「ダイポールモード現象」(図)と呼ばれる現象が存在します。まず、インドネシア付近において、何らかの原因で南東風が強まることで発生し始めます。風が強くなると、東インド洋の方にある表層付近の暖かい海水は、西インド洋の方へと輸送されるので、東インド洋ではそれを補うように冷たい海水が下から上昇してきます。こうしてできた東西の温度差により、さらに東風が強まり、ダイポールモード現象は発達していきます。その結果、インド洋沿岸諸国だけではなく、ヨーロッパや日本の気候にも影響を与えることがわかってきています。気候変動現象は、この他にも太平洋のエルニーニョ現象などが存在します。

私たちは、観測データの解析や数値モデルのシミュレーションにより、様々な気候変動現象のメカニズムや遠隔地への影響の解明、及び予測に向けた研究を行っています。また、自然変動や地球温暖化により、気候変動現象の発生頻度や強度が長期的に変化することも知られており、その解明に向けた研究も進めています。



インド洋熱帯域のダイポールモード現象：ピーク時の海面水温と風応力の平年からのずれ

研究トピック04

大気中の微粒子があたえる雲への影響

空に浮かぶ雲は水や氷の粒子で構成されていますが、そのほとんどは大気中に浮遊する微粒子(エアロゾルと呼ばれています)を核として生成しています。このため人間の工業活動などによりエアロゾルの数濃度が多くなると、そこから生成する雲粒の数濃度も多くなります。雲を構成している水の総量(雲水量)が同じでも、雲粒数の増加は雲粒の断面積の総和を増加させるため、雲は太陽放射をより強く反射するようになります。このエアロゾルによる雲の反射率効果(雲のアルベド効果)は、地球の温暖化を緩和する働きがあると考えられています。さらに雲粒数の増加は(雲水量が同じ場合)雲粒の大きさを小さくするため、雲粒の落下により引き起こされる降水が抑制される可能性があります。降水の抑制(雲の寿命効果)により雲量が増加するとすれば、地球全体の反射率が増加するためこれも地球の温暖化を緩和する方向に働きます。しかしエアロゾル数の増加に対する雲システムの応答の仕方や大きさは、雲を作っている気象場などに応じて変化すると考えられ、その見積もりにはまだ大きな不確実性

があります。エアロゾルは温室効果気体とは別な人為起源物質として、その大気環境や気候影響評価の重要な要素となっています。

そこで私たちは観測航空機により大気中のエアロゾルや雲粒の数濃度やその大きさを測定してその実態を解明するとともに、詳細な数値モデル計算(天気予報などで用いられるモデルにエアロゾルを組み込んだ数値モデル)を開発・利用しその影響の大きさを定量化する研究を実施しています。



エアロゾル・雲観測で使用している観測航空機。翼の下に取り付けられている金色の装置でエアロゾルや雲を測定する。機内にも観測機器が満載され、機体の屋根に取り付けられた取り込み口から空気を機内に引き込んで計測を実施する。

研究トピック01

複雑な階層構造を示す地球大気の物理学

大気物理学は、地上から高度約100kmにおける地球大気を対象とする分野です。ここには、実に様々な現象が存在しています。

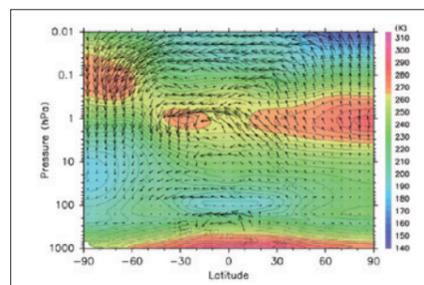
地上から高さおよそ10kmまでの対流圏には、数km～数十kmスケールの積雲や竜巻、前線、数百～数千kmスケールの台風や高低気圧、数万kmスケールの蛇行するジェット気流があります。これらの現象は単独でなく、より小さな、またより大きなスケールの現象と相互作用しています。このようなスケール間相互作用は、流体としての大気の物理が非線形であることに起因します。

高さおよそ10kmから100kmの中層大気(成層圏、中間圏、下部熱圏)は、様々な波動と不安定、大循環が支配する領域です。大気重力波やロスビー波などの大気の内部波は、おもに対流圏で発生し上方に伝播して、中層大気の大循環を駆動していると考えられています。この大循環に乗って、熱帯成層圏で光化学反応によって生成されるオゾンが地球全体に行きわたり、オゾン層となって生命を紫外線から守っています。

私たちは、これらのダイナミックな大気の物理を、観測や理論、高解像度気候モデルにより研究しています。人間活動の気候への影響も視野に、地球温暖化やオゾンホール、夜光雲なども研究対象とし、世界初の南極大型大気レーダーによる精密観測も進めています。



南極昭和基地に設置された大型大気レーダー(PANSYレーダー)(国立極地研究所提供)



地球シミュレータで再現された地上から約75kmの地球大気の温度構造と物質の流れ研究(6月)。

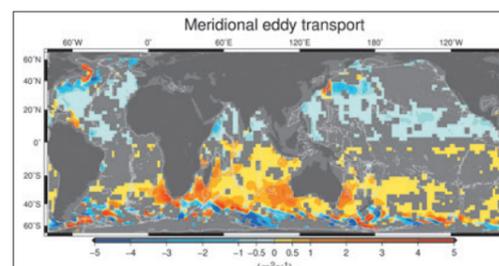
研究トピック02

海流はなぜどのように流れるか

海洋の流れは乱流です。それでいて、ときに海流のような秩序を示します。海流はなぜどのように流れているのか。これが海洋物理学のひとつの問題設定です。

海洋の理解が厄介なのは第一にそれが非線形であること第二にそれが開放系であることという海洋そのものに内在する困難さに加えて、塩水が電波をほぼ通さないために遠くから観測することが難しいからです。非線形であるから紙と鉛筆で解ける解析解は数えるほどしかないのにカオス現象もある。開放系であるから上は大気との下は固体地球との、また遠く月や太陽からも影響を受け続けます。大気からは熱と淡水と運動量、固体地球からは熱と運動量(と、もしかしたら淡水)、月や太陽からは潮汐としての運動量を受け取ります。室内実験が難しいから観測データを案内役に進むしかないのですが、誰かが現場に行くと温度や塩分や流速のセンサーを下ろしてやらないとデータが取れない。

そうはいつても、2010年ころから充実してきた自動観測ロボット「アルゴフロート」や日々海表面のデータを送り続けてくれる人工衛星データや地球の裏まで出かけて行って波にもみくちゃにされながら取ってきた現場観測データなどをシミュレーションの助けで統合して、海流がどのように流れているか、という疑問には答えられる部分も増えてきました。でも未だ「海底近くの海水はどのように表層に戻るのか」「海水が混合する強さはどうやって決まっているのか」「海水の密度の変化と混合とその結果生じる流れ」など分かっていない問題が多く残されています。カオス現象が気象学者ローレンツによって報告されたように、海洋の研究を通じて人間が複雑な自然界を理解する新しい見方が提供出来たら最高だと思います。



定常な海流ではなく変動する渦による表層1000mの海水の南北方向の輸送量。アルゴフロートのデータから推定。暖色は北向き・寒色は南向きに渦が海水を運んでいることを表す。濃い灰色は陸、白のコンターは深さ3000mの海底地形。

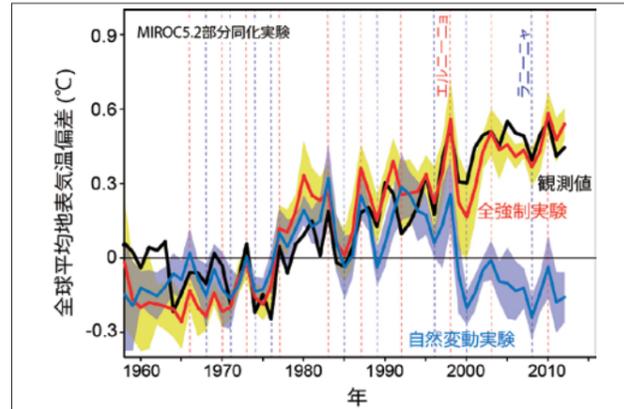
研究トピック 05

地球温暖化に伴う気候システムの変化

IPCCレポートで述べられているように、地球の気候が温暖化していることに疑問の余地はなく、その主要因が人間活動による温室効果気体の排出増であることも確信が高まっています。将来、温暖化がさらに進んでゆくと、気候システムはどう応答し、人間社会に影響の大きな気象現象はどう変化するのでしょうか。このような疑問に、大気・海洋物理学の知識を活かして答えを出すことがまさに求められています。

地球温暖化の研究は、自然の気候変動の研究と隣り合わせです。例えば、過去100年の全球平均気温変動の要因を分析すると、数年規模ではエルニーニョのような気候システムの内部変動が、100年規模では温暖化の傾向が明らかですが、十年規模ではどちらも影響をもちます。一方、地域規模の異常気象などの現象は、従来は気候の内部変動により説明されてきましたが、近年では温暖化に伴う気候の変化が異常気象の発現頻度に影響している例が検出されるようになってきました。また、気候システムの観点からは、温暖化も過去の氷期も、変化の方向が逆なだけでともにエネルギー収支の概念を用いて理解することが可能です。これらのことは、理学的に地球温暖化を研究することの重要性を示しています。

私たちのグループでは、気象学・海洋物理学の専門家が協力して、気候システムの数値モデリングを行っています。気候モデリングは現在も進化を続けており、そこから過去・未来の気候の変化に関する新たな知見が次々に生み出されています。



全球平均地表気温の平年からのずれ。気候モデルを用いた多様な数値実験で、観測された気候変化を再現し、要因分析を行う。

研究トピック 06

台風の新たな描像へ

—身近な現象に秘められた多彩なプロセス—

熱帯の海洋上で、積乱雲の集団が渦巻き始め、台風へと組織化していく様子は、自然の不思議さを感じさせます。

激しい風や雨・高波・高潮を伴う台風は防災上も重要な大気現象ですが、そのメカニズムには現在でも未解明な点が多くあり、活発に研究が行なわれています。以下では、最近進められている多彩な研究のいくつかを紹介します。

台風の中心部は、雲の無い眼とその周りを取り囲む積乱雲の集合からなる壁雲で構成されており、壁雲の中で水蒸気が凝結する際に放出される熱は台風発達のエネルギー源となります。中心部の構造を詳細に調べると、眼は円形とは限らず多角形のこと

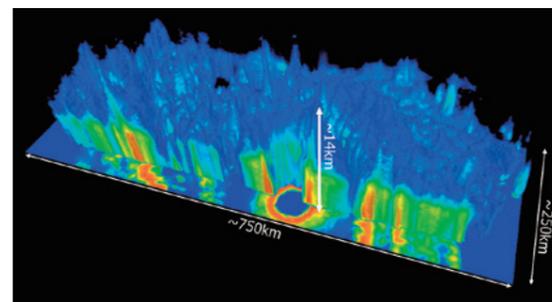


積乱雲を解像する全球モデルNICAMで再現された2012年台風15号

もあること、壁雲は二重構造を持ったり世代交代を起こしたりすることなど、複雑なプロセスがわかってきました。

一方、台風の発生には海面水温や周囲の風の分布、他の大気擾乱など様々な要因が影響し、現在も統一的な理解はできていません。台風の発生には活発な時期と不活発な時期がありますが、その一因としてマッデンジュリアン振動 (MJO) と呼ばれる数十日周期の東進擾乱の影響がわかってきました。地球温暖化に伴って台風がどう変化するかも注目されています。多くのシミュレーションでは、強い台風は増えるが、発生数は減少するという傾向が見られていますが、そのメカニズムは十分に理解されていません。

このように台風はマルチスケールで奥の深い現象です。私たちは最新の衛星観測や高解像度シミュレーションなどのアプローチを活用して、台風の新たな描像の構築に向けて研究に取り組んでいます。

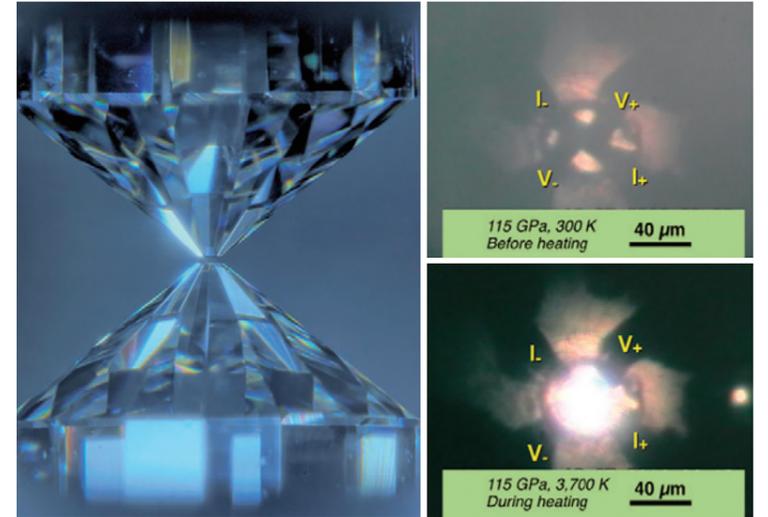


2014年に打ち上げられた全球降水観測計画 (GPM) 主衛星の二周波降水レーダがとらえた2014年台風19号の三次元構造。

研究トピック 07

地球・惑星の内部には何があるのか？
何が起きているのか？

地球・惑星の表層にある物質のほとんどは、その内部の高圧下で相転移を起こし、その結晶構造が変わって、大きく異なる物性を持つようになります。グラファイトがダイヤモンドに変わるのが良い例です。地球深部の物質は自然界では手に入らないのですが、実験室で自ら合成することが可能です。天然のダイヤモンドと高出力のレーザーを用いた「ダイヤモンドセル」と呼ばれる装置を用いて、地球の中心を超える超高压高温環境を比較的容易に作り出すことができます (写真、右下は加熱中)。この装置により、地球内部のあらゆる物質を実験室で合成できるのです。私たちはこのような「超高压高温実験」という手法を用いて、地球や惑星の内部には何があるのか？そこでは何が起きているのか？という謎解きをしています。また地球や火星などの惑星が、どのように形成され、現在の姿まで進化してきたのか？という問題にもチャレンジしています。



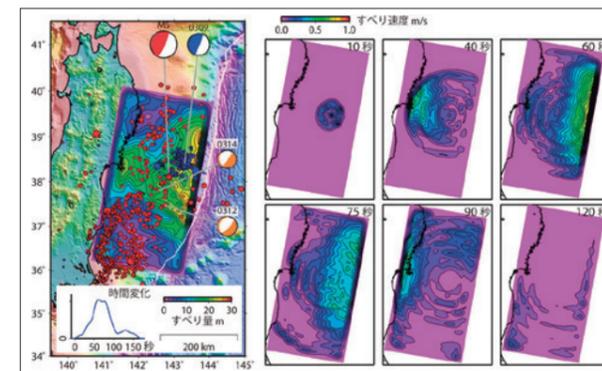
研究トピック 08

地震はどのように起きるのか？

日本は世界有数の地震大国であり、東日本大震災が社会に与えた衝撃が記憶に生々しい現在、その本質を探究することの重要性は明らかです。近年、日本の地震研究は、前兆現象を見つけて地震予知を目指すという方向から、破壊を伴う摩擦すべり現象として地震を捉えなおし、その物理特性を明らかにするという方向へ変化しています。基礎データを得るために展開された地震や地殻変動の観測網は、数々の新発見を生み出しています。一方でマグニチュード9の東北沖巨大地震は研究者の想像を超えるもので、地震研究がまだまだ発展途上の分野であることを再認識させました。

巨大地震がどのように発生したかを解明することは基本的な情報として重要です (図)。巨大地震ほど関心は集まりませんが多数の中小規模の地震も起きています。また最新の地震観測から、「揺れない地震」まであることもわかってきました。これら全部が地震の本質を理解するための手がかりです。新たな実験・観測方法の開発、大量の地震・地殻変動データの分析、現実的な摩擦法則に基づく数値計算、様々なアプローチで地震の本質を極める試みが続いています。

「役に立つ地震予知」はまだ視界に入ってきませんが、手に入る範囲の知識から地震現象の予測可能性を突き詰めるのが当面の目標です。



東北沖巨大地震 (2011年3月11日) の破壊すべりプロセス。
(左) 最終的なすべり量の空間分布。前震を青丸、余震を赤丸で示す。破壊すべりは150秒程度続いた。
(右) 6つの時刻のすべり速度の分布。これらから破壊すべりの進展の様子が明らかになる。

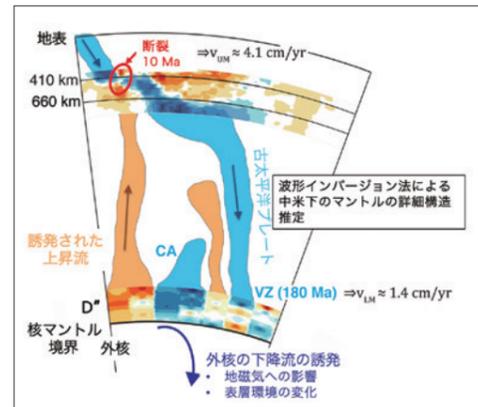
研究トピック09

地球内部の熱対流様式および年代決定

地球の中はどのようになっているのだろうか、地球はどのように進化してきたのだろうか。その問いに答えるために、私たちは、物理を基礎に地球の内部構造及び地球の進化の研究に取り組んでいます。地球の内部構造を正確に把握することで、地球ダイナミクスを理解する上で重要な情報が得られるからです。私たちはこれまで、地震波形をデータとしてそのまま用いて詳細な構造の可視化を実現する「波形インバージョン法」の開発を行ってきました。この数年は「波形インバージョン法」を応用して画期的な成果を上げつつあります。以下に最新の研究成果をご紹介します。

地球の固体部分の体積の約80%を占めるマントルは、対流によって熱を地表に逃がして冷却していきます(熱進化)。

地球の熱進化の過程を理解するためには、マントル対流の様式および時間スケールの情報が必要ですが、これまで定量的に観測データから制約した例はありませんでした。そこで私たちは、古い海洋プレート(スラブ)の沈み込みが過去2億年以上続いている北米・南米大陸の西端のプレート収束帯に注目しました。「波形インバージョン法」を用いて膨大な観測データを解析し、中米下のマントル中に沈み込んだ海洋プレートの詳細な構造の可視化に成功しました(図参照)。得られた高解像度イメージと過去の地質現象とを比較することで、地球内部のスラブの年齢を初めて推定しました。その結果、マントルの粘性率、地球の冷却速度及び下部マントルの対流様式の制約など地球ダイナミクスの理解に大きく貢献しました。今後も「波形インバージョン」を応用して地球深部の複数の場所の詳細な構造推定を行うことによって、地球の進化の理解が進むと期待されます。



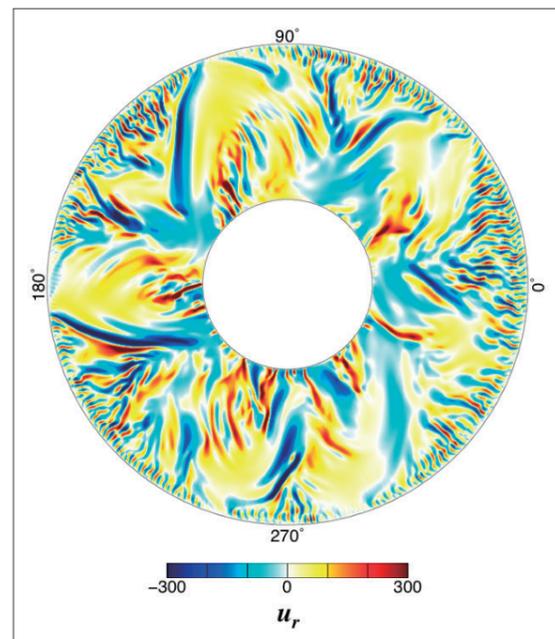
図中の青い領域は地震波の伝播速度が平均より早く、赤い領域は平均より遅いことを意味します。一般的に、高速度領域(図中の青い領域)は温度が(平均より)低い領域であるため、温度の低い過去に沈み込んだプレートと解釈できます。約1000万年前の地球表層でのプレート運動速度の変化に伴い約400kmの深さで沈み込んだ海洋プレートが断層していることがわかりました。また、マントル最下部には2億年前に海溝で沈み込んだ2つのスラブが到達していること、スラブの沈降に伴って高温の物質が受動的に上昇していることがわかりました。その結果、上下マントルで粘性率は約10倍異なることがわかり、これまで推定された値より小さく下部マントルの対流が活発である可能性を示唆しています。また、低温のスラブが外核と接し熱流量を増大することで、地球磁場の源である外核の対流運動に影響を与える可能性が指摘されました(Borgeaud, Kawai+ 2017; 2019)。

研究トピック10

地球ダイナモ

地球がもっている強い磁場は、探検家や他の生物(渡り鳥など)が方位を知る際の手助けとなっているだけでなく、高エネルギーの宇宙線の飛来を妨げるバリアとなって、地表付近の環境にも影響を与えていると考えられています。地磁気は、地球中心部を占める液体金属核(コア)に流れる電流を反映しています。したがって、地磁気を知り、それをつくり出すメカニズムを知ることは、地球深部の活動の様子を推定することにつながります。また他の天体の磁場の存在(または非存在)から、その天体の内部構造や熱進化をひも解くことも可能です。

地球のコアに流れる電流は、エネルギーの入力がなければ、電気抵抗によって数万年程度で消失してしまいますが、液体であるコアが冷却することに起因する熱対流運動をエネルギー源とすることにより、おそらく地球誕生のかなり早い段階からずっと、いまと同程度の強度で保たれています。この仕組みは、ちょうど発電機(ダイナモ)が運動エネルギーを電氣的エネルギーに変換するのとおなじなので、「地球ダイナモ」と呼ばれています。近年、計算機の進歩により、地球ダイナモのプロセスを、数値シミュレーションによって直接再現する研究が可能になってきました(図)。観測される地磁気データとの比較から、地球のコアで何が起きているかに思いをめぐらせるのが、地球ダイナモ研究です。

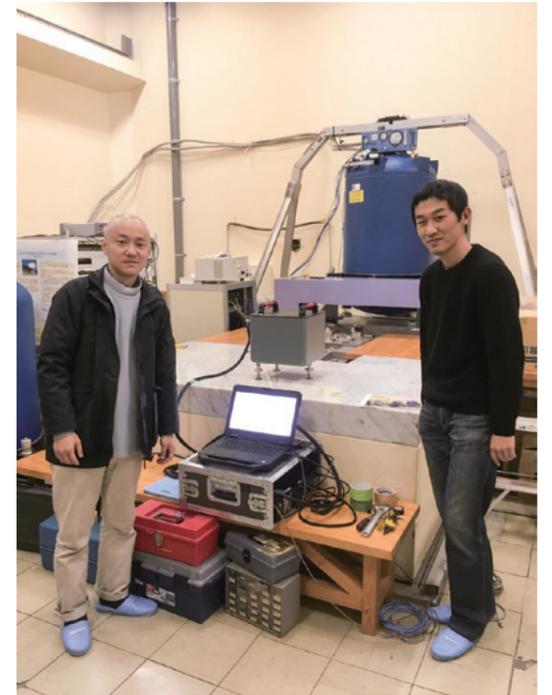


数値実験で得られたコア内部の熱対流のようす。赤道断面での流速の動径成分を色であらわす(赤が上昇流で、数値は磁気レイノルズ数)。内側の円は固体の内核の断面。はげしい乱流による電磁誘導によって電流が生成する。磁場が存在することで、波数6程度の大規模対流構造があらわれる。

研究トピック11

地球の変形を測る

みなさんは「地球が変形する」と聞くと、どのような現象を思い浮かべますか?そして、その時空間スケールはどのようなものでしょうか?おそらくプレート運動や地震による地殻の変形のことを思いついた人が多いかと思います。しかしながら、GPSなどで測地観測を行うと、固体地球がより多様な時空間スケールで変形していることが見えてきます。潮汐や流体核に関係する全球的な変形、氷床融解に伴う地域的な変形、スロースリップによる局地的な変形などです。私たちは、このような地球変形を説明するための理論の構築や観測を行っています。最近の研究では、黒潮大蛇行がスロースリップを誘発し、地震活動に影響を与えることも明らかにしました。また、原子時計の一つである世界最高精度の光格子時計を用いた、一般相対論に基づく地殻変動検出の研究も開始しました。高精度に測ることを通して、地震学と地質学の時間スケールをつなぐ固体地球のダイナミクスを解明することを目指しています。



10nm/s²(地表重力の約10億分の1)を測る重力計で地殻流体の移動を捉える

研究トピック12

フィールド調査で探る地震と活断層

地震の本質は、ゆっくりとしたプレート運動によって絶え間なく蓄積される応力を、断層面の摩擦強度が支えきれなくなってずれ動くという、間欠的な運動の繰り返しです。しかし、大地震の繰り返し間隔は、100年や1000年といった長期間であり、最近数10年で整備されてきた現代的な観測網のデータではカバーしきれないことが、地震の理解に立ちふさがる大きな困難です。それを乗り越えるには、もっと過去に遡って断層運動の履歴を調べる必要がありますが、過去に発生した地震の痕跡は、地層の中に眠っています。

地震が発生すると、地表や地下に様々な変化が生じます。断層がずれ動くことによって生じる、地形の段差もそのひとつです(図)。このような断層運動が整然とした堆積構造を乱すことで生じた、地震の痕跡をフィールドで掘り起こすことができるのです。また、海溝型の大地震に伴う津波が、海底の砂などを巻き込みながら遡上すると、陸上に津波堆積物を残します。

断層運動による摩擦発熱や破碎などの痕跡が、断層を構成する岩石に残されることもあります。

一方、フィールド調査のデータから、過去の地震像を復元するには、物理モデルと数値シミュレーションが欠かせません。幅広い知識と多彩な手法を駆使して地震の本質に迫ろうとしています。



長野県北部の地震(2014年11月22日)で生じた地表断層。元々平坦な畑だったが、右手側が逆断層運動により約85cm相対的に隆起した。

研究トピック13

比較惑星学

地球型惑星はどれも非常に個性的であり、その表面の環境は変化に富んでいます。最近では、太陽以外の恒星のまわりでも、地球型惑星と思われるような惑星もたくさん発見されるようになり、これらの惑星もおそらく多様な姿をしているに違いありません。地球型惑星の多様性はどのように生まれたのでしょうか。多様性を生み出す要因を理解することは、個々の惑星の特徴が生成される条件を理解することにつながります。さまざまな惑星を比較し、惑星の個性がいかにかまわっていかを理解しようとするのが比較惑星学です。

太陽系外の惑星まで視野におき、とりわけ地球の様に生命にとって好適な環境を生み出す要因を明らかにしたいと考えています。そのために、主に惑星初期進化学、惑星気候学から研究を進めています。研究の一例として、生存可能惑星環境の重要な指標として液体の水の存在条件について紹介します。従来の研究では生存可能惑星として地球のようにふんだんにH₂Oがある惑星が考えられてきましたが、H₂Oが少なく砂漠が広く広がっているが、局地的には液体の水があるという場合も生存可能といえるでしょう。火星などは過去においてそのような状況にあった可能性があります。このような状況の惑星の気候を検討してみると、直感に反してH₂Oがふんだんに存在する場合よりもはるかに広い条件の下で液体の水が存在できそうであることがわかりました。これはH₂Oが惑星環境を不安定化するような性質を持っていることが原因です。



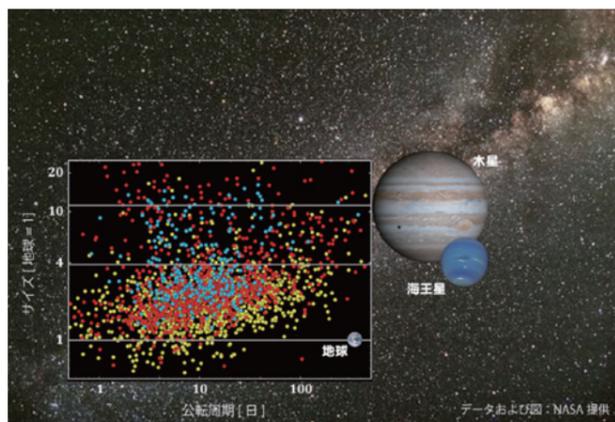
水星、金星、地球、火星

研究トピック14

系外惑星

私たちは、「太陽」という恒星のまわりを公転する「地球」という惑星に住んでいます。20世紀末(1995年)までは、太陽系だけが私たちの知る唯一の惑星系でした。しかし現在では、私たちは太陽系外の惑星(系外惑星)の存在を知り、その数は5000を超えています。地上を離れて宇宙に望遠鏡を運び、宇宙での惑星探査や大気の観測も進んでおり、最新報告によればその中には地球と同程度の大きさを持つ天体がたくさんあります。しかし、これまでに見つかった惑星系は実に多様な形態を持ち、太陽系が標準的な惑星系というわけではなさそうです。

多くの場合、系外惑星について測定される量は、質量と半径、公転周期です。そうした観測量に基づいて、理論的に系外惑星の状態や組成を推定する取り組みを我々は行っています。また、最近では発見された系外惑星の大気の観測が進みつつあり、今後は大気の「特徴づけ」を系統的に行う中で系外惑星の起源を探る研究が進展することも期待されます。そして、私たちが住む地球が、宇宙の中でどれくらい存在し、どういう惑星系にあるかを解明することを目指しています。

宇宙望遠鏡ケプラーが向いている方向(背景)と検出された惑星候補天体(グラフ)
データおよび図: NASA 提供

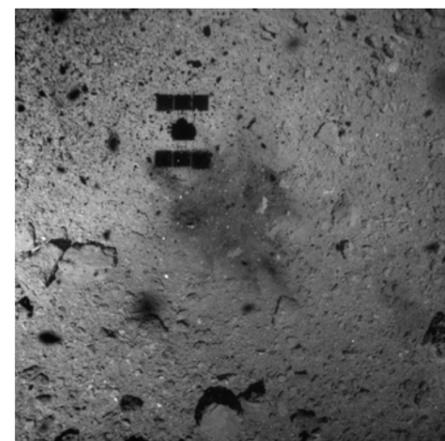
研究トピック15

固体惑星の探査

現在、太陽系探査は二つに意味において大きな変革期を迎えている。一つは、惑星形成理論の静的描像から動的描像への変革である。

従来の描像では形成から現在まで惑星の太陽距離が不変だと仮定されてきたが、現在の描像では惑星は大きく移動する可能性が出てきたのである。この理論の自由度増大により惑星形成理論の多くの謎が解ける可能性が出てきたと同時に、従来に比べて圧倒的に多くの観測データが必要になったのである。世界の多くの小天体探査機の多くは、この課題に取り組んでいる。もう一つは、火星、氷衛星、小惑星に多くの地下水系や内部海が発見され、生命の可能性に現実性が出てきたことである。特に、エンケラドス、エウロパ、小惑星ケレスには内部海から噴出するジェットないしその痕跡が見つかっており、内部海の詳細を実証的に調べられる可能性も高い。

このような太陽系科学の変革が起きる中、日本は月周回機「かぐや」、小惑星探査機「はやぶさ」、「はやぶさ2」と数々の惑星探査を成功させ、世界最先端の成果を挙げつつある。これらの探査で得られたデータと試料は世界最先端のものであり、高度な解析・分析によって太陽系の起源と進化に関する様々な知見が得られることが期待されている。さらに、JAXAの火星衛星探査機MMXなど次世代探査機の理学搭載機器の開発にも参画しており、中核的な役割を担っている。また、その先の月惑星着陸探査を目指した質量分析装置やレーザー誘起元素分析装置の開発、太陽光の弱低温のOuterSolarSystemの探査を目指した高感度カメラ開発なども行っている。



探査機はやぶさ2が小惑星リュウグウ表面で試料採取した直後の上昇中に得た画像。(画像提供: JAXA/東京大/高知大/立教大/名古屋大/千葉工大/明治大/会津大/産総研)

研究トピック16

宇宙プラズマの普遍的理解

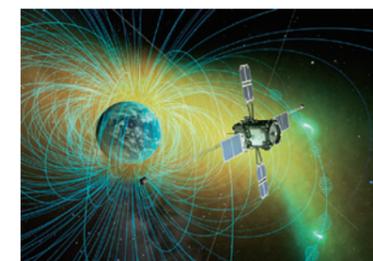
地球周辺の宇宙空間では、非常に希薄なガスが電離して「プラズマ」と呼ばれる状態になっています。人工衛星を飛ばしてこの宇宙プラズマを「直接観測」すると、さまざまなおもしろい現象が起こっていることがわかります。地球近傍だけでなく広い宇宙空間の99%以上はプラズマで満たされているといわれていますから、このようなプラズマ現象を調べることで、宇宙での高エネルギー・プラズマ現象の物理に迫ることができます。たとえば、地球や惑星の周りには太陽風と呼ばれる数百km/sもの超音速プラズマの流れが太陽から吹いています。この流れが惑星磁場と衝突する箇所に衝撃波ができますが、そこでの粒子加速の理解が、超新星爆発衝撃波で生成される宇宙線の起源の解明に密接に係わっています。また地球磁気圏での磁気リコネクション(磁力線つなぎかわり現象)の研究は、パルサー磁気圏・活動銀河核ジェットなどでの磁場エネルギー解放の理解の基礎となっています。地球や木星・土星で観測されるオーロラは、太陽風のエネルギーが磁気圏内部に輸送されることにより起きます。

地球周辺プラズマのもうひとつの代表例が太陽で、星全体がプラズマの塊です。太陽大気中でおこるプラズマ爆発はフレアと呼ばれており、現在の太陽系における最大級のエネルギー解放で、コロナ中に蓄えられた磁気エネルギーが磁気リコネクションで一気に解放される現象です。フレアの際にも加速粒子が発生し、その総エネルギーが解放される半分近くに達するかもしれません。さらには、フレアと同時に数十億トンもの大量のプラズマガスの塊が放出されることがあります。

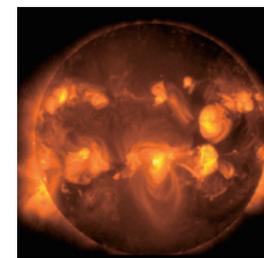
このようなフレア現象をはじめとする、太陽で観測されたダイナミックなプラズマ現象は、「活動的な宇宙」というあたらしい宇宙観をもたらしました。ブラックホールや生まれたばかりの星の周囲でも、おそらくは似たようなダイナミックな現象がおこっているに違いありません。



Chandra衛星による超新星残骸SN1006のX線画像



「あらせ」衛星によるプラズマ粒子・電磁波の観測



X線で観測した太陽コロナ(Hinode/XRT) ©国立天文台/JAXA

研究トピック 17

飛行体を用いた惑星大気・プラズマの観測

惑星やその周辺空間の様子を調べるためには、人工衛星や探査機を用いた観測が極めて有効です。特に、地球大気の吸収がない宇宙空間に出れば、赤外線からX線まで、宇宙に溢れる様々な波長の光を用いた観測が可能です。

2013年に打ち上げられた地球周回の惑星観測衛星「ひさき」には、極端紫外と呼ばれる特殊な波長を観測する分光器 (EXCEED) が搭載されており、木星オーロラや周囲のプラズマ、また金星や火星の大気の様子などを継続的に観測しています (図1)。2015年に金星周回軌道に投入された「あかつき」探査機は、金星の大気がダイナミックに変動する様子をさまざまな波長帯のカメラを用いて詳細に観測し、これまで謎に包まれていた金星大気の様子を明らかにしています (図2)。2018年に打ち上げられたBepiColombo国際水星探査計画では、様々な種類の観測装置を用いて水星の大気、プラズマ、磁場や電磁波の様子を調べる予定です。また、2020年代にはMMXという火星衛星 (フォボス) 探査およびサンプルリターン計画も予定されています。これらの探査機がもたらす貴重なデータを用いた科学研究はもちろんですが、探査機に搭載する観測装置の開発も、惑星科学の分野では重要な研究テーマのひとつです (図3)。

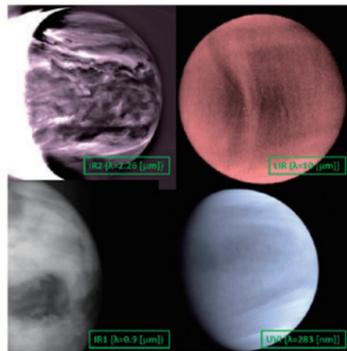


図2 「あかつき」に搭載された4台のカメラ (IR1, IR2, LIR, UVI) が捉えた金星大気の様子。観測波長ごとに異なる高度の雲の構造が見える。

ところで、これら比較的大型の探査計画は、大きな科学成果を期待できる反面、立案から実現までには10年以上の長い年月が必要で、費用も膨大になります。その一方で、50kg以下の超小型探査機 (CubeSat) を活用した科学観測も近年非常に発達しています。科学目標を精緻化することで開発期間を2~3年に抑え、頻度の向上に繋がります。2014年に「はやぶさ」探査機の相乗りとして打ち上げられ、彗星や地球周辺の水素原子分布を観測したPROCYON探査機 (約60kg) に続いて、2019年には月・地球の第2ラグランジュ点から地球を取り巻くプラズマ圏の変動を観測するEQUULEUSミッションの開発が進められています。

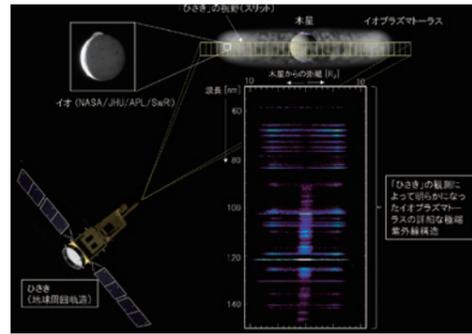


図1 「ひさき」が捉えた木星周辺プラズマの極端紫外スペクトル

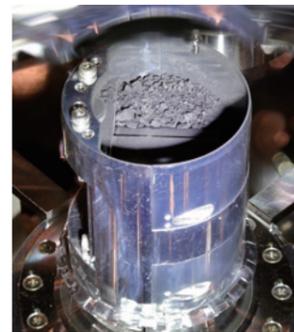


図3 飛行体搭載装置 (フライトモデル) の開発風景

研究トピック 18

太陽系の誕生と進化

太陽系は45億6700万年前に誕生しました。太陽系の材料となった金属元素は恒星でつくられ、塵として太陽系にもたらされました。太陽系の誕生させた暗く冷たい分子雲では複雑な有機物がつくれ、やがて誕生した太陽のまわりの原始惑星系円盤でも様々な化学反応が起こった後に、塵が集積して、小天体が形成されました。小天体同士は衝突して合体し、地球をはじめとする多様な惑星へと成長していきました。これらの過程を記憶しているのが、隕石などの地球外物質です。隕石などに含まれる物質の元素組成や同位体組成を高精度で分析することで、その形成年代や形成環境を読み出すことができます。また、太陽系初期に近い温度や圧力、化学条件を再現した化学反応実験によって、惑星材料の進化の場の物理化学条件を定量的に制約することも可能となります。太陽系の誕生や進化の情報をよく記憶するサンプルを求める探査もおこなっており、「はやぶさ2」探査機は小惑星リュウグウを観測し、その起源や地質活動の理解に繋がるデータを取得し、地球へのサンプルリターンに成功しました。試料の分析から、リュウグウが太陽系の材料を代表する化学組成をもつこと、水を含む鉱物や有機物も含み、地球に海や生命の材料をもたらした天体の仲間でありうることなどが明らかになりました。これらの分析成果を星や惑星系の形成場の天文観測 (アルマ望遠鏡など) やシミュレーションの結果とも融合し、太陽系の誕生と進化を理解しようとしています。



第1回着地で採取されたリュウグウサンプル ©JAXA

地球惑星物理学では、地球や惑星の上で生起する複雑な物理現象の仕組みを正確に把握するために、数値シミュレーションを積極的に活用して研究を行います。

ここでは、地球惑星物理学で行われているスーパーコンピュータを駆使した大規模数値シミュレーションの一例を紹介いたします。このような数値シミュレーションは現代の地球惑星物理学の英知の結晶とも言えるもので、そこには長年に渡って蓄積された観測事実や理論に基づく数値モデル開発の成果が反映されています。

地球惑星物理学では、数値シミュレーションの基礎から応用までを学べる様々な講義・演習が用意されています。まず3年次には「地球惑星物理学演習」でプログラミングやデータ解析、データ可視化の基礎技術を習得します。さらに、「地球物理数値解析」では数値シミュレーションの基礎となる偏微分方程式を数値的に解く手法について学びます。

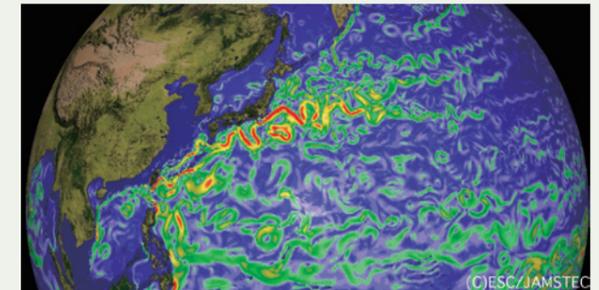


地球シミュレータ (提供: (独)海洋研究開発機構)

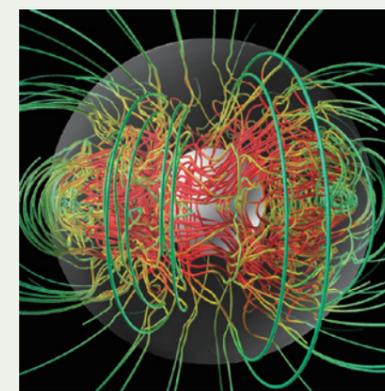
その後、4年次の「地球惑星物理学特別演習」と「地球惑星物理学特別研究」では、特定の研究課題について数値シミュレーションを実行したり、最先端の大規模数値シミュレーションで得られたデータを解析したりする機会が与えられます。さらに大学院に進学すれば、「大気海洋」「固体地球」「宇宙プラズマ」など各分野の最先端の高度な数値シミュレーション手法についてより詳しく学ぶことができます。

地球惑星物理学では、こうして習得した数値シミュレーション技法を使って皆さんが地球・惑星上の様々な物理現象を見る目を養い、それらを解析し理解することの面白さを学んでくれることを期待しています。

大海原の流れは、ゆったりと、あまり変化していないと考えられることが多いですが、実際には、非常にダイナミックに変動しています。この図は、世界最大規模のスーパーコンピュータである「地球シミュレータ」を利用して、刻々と変化する地球全体の海洋を高解像度でシミュレーションをした結果です。海面での流れの強さを表しており、暖色系の色で示される強い流れが大きく蛇行しながら、時には渦を作りながら流れている様子が明瞭に示されています。海洋物理学と計算科学の連携により、あたかも人工衛星から見たような海洋の変動を再現することが出来るようになりました。



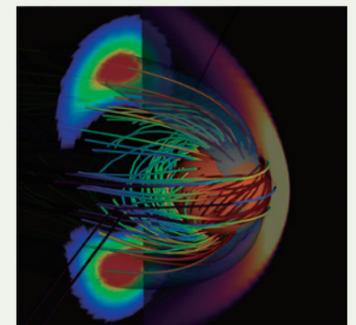
図提供: (独)海洋研究開発機構



左の図は、地球ダイナモ (7ページ・研究トピック10参照) の数値シミュレーションによって得られた、液体金属コア (灰色の球殻部分) の内部およびその周辺の磁力線の様子を、赤道方向から透視したものです。赤色の磁力線は磁場の強いところを示しています。コアの外側は比較的単純な双極子型の磁場ですが、内部の磁場構造は、流体の乱流運動を反映して、きわめて複雑です。とくに赤道面に平行な磁場成分 (トロイダル磁場) が卓越していることがわかります。

右の図は、太古の火星からの大気流出現象の数値シミュレーション結果の例で、太陽からのプラズマ流である太陽風が惑星の大気や固有磁場と相互作用する様子が示されています。多成分磁気流体力学近似の方程式系に、

上層大気でおこる光化学反応などを組み入れ、惑星上層大気から惑星間空間までをシームレスに計算することで、火星から大気の流れ出す様子を再現することができます。こうしたシミュレーションは、太古の火星がハビタブルな環境を失った理由を探る研究や、系外惑星からの大気流出の研究などに応用されています。



地球惑星科学は、地球・惑星・太陽系の過去(起源/歴史)・現在・未来のすべてを解きあかそうとする学問ですので、その性格上、広範な科学的知識とそれを活用する能力が不可欠な分野です。この分野を志望する皆さんに対し、本学科では物理学を基礎とした研究学習能力を陶冶する機会・舞台を提供しています。学部段階では専門を絞り込まないため、地球や惑星上で生起する様々な現象の基礎を広く学ぶことができることも大きな特徴です。

2年A1, A2ターム	3年S1, S2ターム	3年A1, A2ターム	4年S1, S2ターム	4年A1, A2ターム
【必修科目】	【選択必修科目A】	【選択必修科目A】	【選択必修科目A】	【選択科目】
地球惑星物理学基礎演習I 解析力学・量子力学Iに関する演習問題を解く。	地球流体力学I 様々な自然現象や身の回りの日常現象を支配する流体力学の基礎原理を学ぶ。	地球流体力学II 密度成層や地球回転の影響を受ける地球流体の運動の基礎的概念と解析手法を概説する。	惑星大気学 地球大気圏・電離圏・磁気圏から太陽地球系空間までの普遍的物理・化学過程を解説する。	大気海洋系物理学 大気海洋間の力学的・熱力学的相互作用に与える様々な時間規模の過程を概説する。
地球惑星物理学基礎演習II 物理数学I、電磁気学Iに関する演習問題を解く。	弾性体力学 連続体力学(弾性体力学)の基本概念と基礎方程式の導出・解法について解説する。	地球力学 地球の形状・重力場・潮汐等の測地学的基礎論とグローバルな地球変形について解説する。	【選択科目】	地球内部ダイナミクス 固体地球ダイナミクスの基礎概念と地球科学の諸問題への応用について解説する。
物理数学I* 複素関数、Cauchyの積分公式、Fourier級数と積分変換等について解説する。	量子力学II* 中心場中の定常状態のSchrodinger方程式の解、角運動量の諸性質等について解説する。	統計力学II* 相互作用がある系での統計力学の手法を説明し、相転移の基礎的な概念、機構を説明する。	【選択科目】	地球物理データ解析 インバージョン解析の基礎理論とその地球科学の諸問題への応用について解説する。
物理数学II* 量子力学や電磁気学など物理学一般に広く用いられる数学的道具・手法を解説する。	電磁気学II* 電磁場の基本法則、静電場・静磁場と定常電流、電磁波について解説する。	【選択科目】	地球惑星内部物質科学 地球惑星内部の高圧高温極限条件下における物質の構造・物性・相転移等を解説する。	地球物理データ解析 インバージョン解析の基礎理論とその地球科学の諸問題への応用について解説する。
物理実験学* 物理実験に必要な基礎知識(基礎物理定数、計測法、誤差論等)について講義する。	統計力学I* 熱統計現象を微視的視点から記述しようとする統計力学の成立基礎と基本概念を学ぶ。	大気海洋物質科学 大気及び海洋中の物質の分布とそれを支配する各過程の基礎について概説する。	気象学 地球大気の特徴を概観した後、水の変相変化、対流、波動等の各物理過程の理論を展開する。	地球物質循環学* 大気-海洋-生命圏間、地球表面-内部間での物質循環と地球環境進化の関係を理解する。
電磁気学I* 電磁気学の基礎を特殊相対性理論との関係を軸として解説する。	【選択科目】	宇宙惑星物質進化学* 物質科学の観点から、太陽系の起源、地球・惑星の起源と進化についての理解を目指す。	海洋物理学 平衡状態にある海洋に外力が加わり、その平衡状態が乱された時の力学的応答を解説する。	【選択必修科目B】
解析力学* 解析力学の体系を学ぶ。	宇宙空間物理学I プラズマ諸現象をプラズマ物理の基礎概念及び電磁流体力学の基礎過程とともに解説する。	気候システム学* 現在の気候系の形成機構とそれに関わる物理過程、及び過去・将来の気候変化の仕組みを理解する。	比較惑星学基礎論 地球型惑星とその衛星等の最新の科学的見地の紹介と太陽系の起源と進化の解説を行う。	地球惑星物理学特別研究 特定の研究課題を選び、その課題を内部的に解決することを目的として実習を行う。
量子力学I* 量子力学の初歩を学ぶ。	大気海洋循環学* 大気と海洋の熱構造や循環構造を概観し、その仕組みの理解に必要な基礎知識を概説する。	地球電磁気学 地球の電磁気的な性質と地球の現在の活動、誕生後の進化過程の関係について解説する。	地震物理学 地震の発生過程を理解するために地震の震源の表現、及び地震破壊過程の扱いを解説する。	集中講義
【選択科目】	固体地球科学* 地球内部構造、レオロジーとダイナミクス、及びそれらと地表面現象の関連性を解説する。	弾性波動論 弾性波の伝播の基礎を学ぶ。解析解を導くとともに数値シミュレーション手法を学ぶ。	地球惑星システム学基礎論 地球・惑星を構成する各圏の特徴と相連、各圏間の相互作用と発展について解説する。	【必修科目】
地球惑星物理学概 地球科学的なもの、および現代的な地球・惑星観について概説する。	地球惑星物理学基礎演習III 連続体力学に関する演習問題を解く。	宇宙空間物理学II プラズマ諸現象を磁気流体力学・プラズマ運動論の基礎過程とともに解説する。	地球物理数値解析 偏微分方程式を数値的に解くための手法(差分法、有限要素法)を説明する。	研究倫理 科学研究を進める上で規範となる研究倫理を解説する。
情報科学* 集合・関係・束、情報理論、代数(群・環・体)とその情報科学の応用を学ぶ。	地球惑星物理学基礎演習IV 熱・統計力学に関する演習問題を解く。	電磁気学III* 電磁波が荷電粒子の運動からどのように放射されるかを導き、光学法則について解説する。	火山・マグマ学* マグマの生成・移動・固結・分化・混合や噴火の基礎的プロセスを学習する。	【選択科目】
形式言語理論* 形式言語とオートマトン、および、計算可能性の初歩について講義する。	【選択必修科目B】	量子力学III* 散乱の量子論、多粒子系の量子論、経路積分による量子論について解説する。	位置天文学・天体力学* 太陽系天体の運動に代表される質点系力学の定量的かつ定性的な性質を論じる。	臨床理学実習 人類社会の未来に関わる諸課題に関する視点から現場で学び、主体的に考えるための実習を行う。
天文学概論* 現代の宇宙観までの道のり、宇宙の起源と現在の姿、恒星、元素の起源等について学ぶ。	地球惑星物理学演習 地球惑星物理学の諸問題を解決するために必要な数値計算・情報処理の基礎技術を習得する。	【選択必修科目B】	星間物理学I* 銀河系の恒星間に広がる星間ガス、星間ダストなど星間物理学の基本的な概念や考え方を習得する。	【選択科目】
化学熱力学I* 熱力学第一、第二、第三法則、エントロピー、化学平衡、溶液化学等について学ぶ。	地球惑星物理学観測実習 様々なデータを自分自身で取得する実習を通じて、地球惑星物理学における観測の意義を学ぶ。	地球惑星物理学実験 地球惑星物理学の研究を行うのに必要な基礎的実験・観測技術を習得する。	星間物理学II* 爆発的星形成銀河、活動銀河核、宇宙初期の銀河など、銀河系以外の銀河の多様な星間現象を取り扱う。	【選択必修科目B】
量子化学I* 原子・分子系の量子力学の基礎(分子論、分子回転と水素原子の量子力学)について学ぶ。	【選択必修科目B】	地球惑星化学実験 地球及び惑星を構成する物質の物理化学的性質の理解とその測定方法を習得する。	系外惑星* 近年研究の進展が著しい太陽系以外の惑星の形成・進化過程の一般論を解説する。	【選択必修科目B】
無機化学I* 無機化学に重要な基本的な概念(多電子原子の性質、分子の構造と結合等)を学ぶ。	【選択必修科目B】	【選択必修科目B】	【選択必修科目B】	【選択必修科目B】
必修科目	選択必修科目	選択科目	選択必修科目B	選択必修科目B

※：他学科開講科目

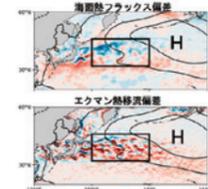
地球惑星物理学科には卒業論文や卒業研究はありませんが、それに代わるものとして、地球惑星物理学特別演習(第4学年S1, S2ターム)と地球惑星物理学特別研究(4学年A1, A2ターム)が開講されます。特別研究(A1, A2ターム)の終わりには、成果を発表する機会が設けられています。

【テーマ】
太平洋十年規模変動に伴う大気海洋相互作用

田村 優樹人
[担当教員]中村 尚・小坂 優

内容 太平洋には太平洋十年規模変動と呼ばれる大気海洋結合変動が存在します。海面水温変動に伴い大気も変動するため、世界各地で異常気象に影響し、地球温暖化速度にも十年規模で影響を及ぼす重要な現象です。私は空間解像度の異なる3つの気候モデルの数値実験データを用いて、その変動メカニズムの解明やモデル解像度依存性の評価を目的に研究を行いました。先行研究と観測データから、黒潮と親潮が合流し水温勾配が大きい亜寒帯海洋前線帯で十年規模変動が特に強く現れることがわかっています。解析から、亜寒帯海洋前線帯で海面水温が高いとき、海面からの熱放出が強化される一方、海上風偏差が駆動する流れ(海洋エクマン流)が熱を移流することで高い水温を維持することがわかりました。この結果は、海洋力学過程によって形成・維持される十年規模の海面水温偏差が、大気に熱的にフィードバックしている可能性を示唆します。また、低解像度モデルでは大気変動パターンと海洋前線の微妙な位置関係がずれ、変動が上手く再現できておらず、モデル解像度の重要性も示唆されました。

感想 論文講読では英語や専門用語に苦しみましたが、先生方の親身な指導のおかげで長い論文も読むことができました。講読が進んだところでデータ解析を始め、こちらは研究室のみならず手が貸してくれました。小柴ホールでの発表と発表スライド作成も、大変でしたが非常に良い経験になりました。発表の核となる解析結果にたどり着くまでは長く苦しい時間でしたが、その分結果が得られたときには何物にも代えがたい喜びを得られました。



高解像度モデルにおける、亜寒帯前線帯(矩形領域)で平均した海面水温の十年規模変動成分に対する海面熱フラックス偏差(上)とエクマン熱移流偏差(下)の回帰偏差(W/:加熱する向きが正)。コンターは海面気圧の回帰偏差(0.4 hPa每)。

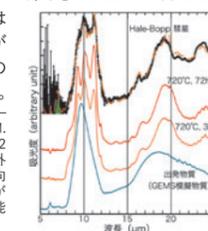
【テーマ】
彗星塵中の結晶質ケイ酸塩の起源

萩原 万里奈
[担当教員]瀧川 晶・橋 省吾

内容 彗星塵に多く含まれるGEMS (Glass with Embedded Metals and Sulfides; Fe-Ni合金や硫化物が埋め込まれた非晶質ケイ酸塩)は、惑星系形成を経たケイ酸塩の生き残りの一例です。今回の特別研究では、GEMSが原始太陽系円盤内側の高温領域で高密度ガスが急冷した凝結物であるという説があることから、GEMSが形成後その場で加熱により結晶化をした可能性に注目して、GEMS模擬物質の真空加熱実験を行い、円盤外側の低温領域でできたとされる彗星中に観測されている結晶質ケイ酸塩を説明できるかを検証しました。その結果、GEMS模擬物質の加熱によるかんらん石や輝石の段階的な結晶化や、かんらん石および金属Fe-Ni合金の組成の変化が見られました。また、彗星を観測した赤外スペクトルが、結晶化がある程度進行したGEMS模擬物質の赤外スペクトルで説明が可能であることが定性的にわかりました。今後は、加熱後試料から同定された結晶質ケイ酸塩の成り立ちの理論的説明や結晶化の定量的議論などを目標に、さらに多くの条件で実験を進めていきたいと思っています。

感想 初めは特に鉱物学に関する知識があまりない状態でしたが、先生方と頻りに丁寧なコミュニケーションを重ねながら少しずつ取り組むことができました。また、研究グループの院生の皆さんや環境学科の卒業生の方々の実験室の共用やミーティングへの参加を通して研究生活の一部を感じることができました。自分で手を動かして得た実験データの解釈・検証は研究の醍醐味ですが、先生方のご助力を受けながらもその自由さ・楽しさを直接味わうことができたのは今後につながるとても良い経験だったと思います。

Hale-Bopp彗星の赤外線観測スペクトル(引用元: Lisse, C. M. et al. (2007) Icarus 187, 69.)、および720°Cで3時間または72時間加熱したGEMS模擬物質の赤外スペクトル。横軸は赤線の波長(5-25 μm)、縦軸は吸光度(必要に応じて縦軸方向に平行移動して表示)。GEMS模擬物質の加熱により結晶化が進行することや、実際の彗星の観測データを定性的に説明可能であることがわかる。

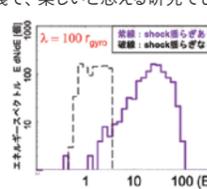


【テーマ】
高エネルギー宇宙線の起源解明に向けた研究

森川 莞地
[担当教員]大平 豊

内容 宇宙線とは宇宙からやってくる高エネルギーの陽子や電子などの粒子です。百年以上前に発見された宇宙線は多くの謎を抱えており、そのうちの一つに最高エネルギー宇宙線の加速問題というものがあります。宇宙線の最高エネルギーは10²⁰eV(人類が加速できる粒子の最高エネルギーは10¹²eV)にもなりますが、そこまで加速するための物理的な機構はわかっていません。候補の一つとして粒子が衝撃波面を往復することで加速する、衝撃波統計加速という加速機構を考えてシミュレーションを用いて粒子加速の有無を調べる研究を行いました。これまで衝撃波統計加速では衝撃波速度が非相対論的な場合にのみ加速が起きると考えられていて、相対論的な場合には粒子加速は起きないとされてきました。今回、相対論的な場合において、これまで考えられていなかった衝撃波面自体が揺らぎを持っているという効果を取り入れることにより、効率の良い粒子加速が起こることが判明しました。爆発を伴う天体現象では、相対論的衝撃波が形成されることがあり、これらが最高エネルギー宇宙線の加速源として有力であることが示されました。

感想 全く知識ゼロのところから研究を形にするまで研究と並行しながら自分に足りない知識を勉強できて、とても有意義で、楽しいと思える研究でした。大平先生をはじめ、研究室の先輩にもご助力いただき、その中で実際の研究の雰囲気に触れることができました。四年生のA semesterのみという短い期間でしたが、今後大学院に進学し、自分の研究生活を始める上での第一歩になったと思います。



衝撃波速度のローレンツ因子が100の場合の粒子加速のエネルギースペクトルを表した図。衝撃波面の揺らぎがあることにより粒子のエネルギーが増幅していることがわかる。横軸は初期のエネルギーで規格化しており、縦軸は粒子の個数を表している。

【テーマ】
分子シミュレーションから迫る摩擦の物理

杉本 理空
[担当教員]河合 研志・佐久間 博

内容 地震が発生する際に断層においてどのような摩擦力がかかっているのか、それがわかれば地震発生メカニズムがよりはっきりとわかってくるでしょう。私たちは、高温・高圧の地殻でどのような摩擦が発生しているのかを、物理学の観点から研究しています。摩擦の法則を理解するために様々な実験がなされてきました。摩擦の実験から得られる経験則は多いですが、その背景にある理論は未解明であることが多いです。例えば、高校物理で習うF = μNという式も経験則であり、その理論背景も完全にわかったわけではありません。主要な摩擦の実験法則を説明する理論のうち、有力なものとして「凝着説」があります。図1のように二つのブロックが滑っているとします。摩擦力は、見かけの接触面積ではなく、真実接触面積に比例するという理論です。私たちの研究でも「凝着説」を用います。高温・高圧での真実接触面積がわかれば、比例する摩擦力の傾向もわかってきます。真実接触面も直接見られればいいのですが、高温・高圧下で観察するのは困難です。そこで私たちは、分子スケールでのシミュレーションを用いて理論的に、高温高圧での真実接触面積を調べてみることにしました。詳細な方法についてはスペースの都合で省略しますが、最終的な結果は図2のようになり、少なくとも真実接触面積の温度変化については、実験的な摩擦係数の温度変化と整合的であることがわかりました。



感想 私は古典物理が好きなので、摩擦の理論という古典物理の中で重要な難解な問題にチャレンジできたのは、とても楽しかったです。分子スケールでの摩擦が地球現象につながるなど、一気にスケールが大きくなり、そのギャップも魅力的だと思います。

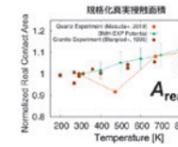


図2: 真実接触面積の温度依存性(300 Kの値で規格化)。緑三角が計算値、丸が摩擦係数から求めた実験値。理論的に求めた真実接触面積は、実験的な摩擦係数をよく再現しています。

あらゆる機会・舞台が存在します。

【生活】

2年A1, A2ターム [駒場ではじめる地物生活]

- 9月 進学内定・ガイダンス
- 9~1月 基礎演習で基礎物理・物理数学を鍛える
- 1月 新入生歓迎会 初めての会う先輩・教員

3年S1, S2ターム [本格的な地物生活スタート]

- 4月 めでたく本郷に進学
- 4~7月 計算機演習では院生TAが手取り足取り
- 5月 五月祭恒例の公開実験
- 7~8月 初めてのフィールド観測

3年A1, A2ターム [より専門的になる講義が面白い]

- 9月 地物実験開始(計5テーマ)
- 9~1月 知的好奇心を刺激する実験課題がたくさん

4年S1, S2ターム [進路・将来に悩む頃]

- 4~7月 前期演習は初めてのテーマ研究
- 5月 学会を見学して研究の最先端を知る
- 7~8月 夏休み 試験や大学院の研究室選びに悩む
- 8~9月 大学院入試 合格発表

4年A1, A2ターム [やりのこしたことはないか?]

- 9~1月 後期演習は最先端研究への入口
- 9~11月 大学院進学研究室訪問&決定
- 1月 後期演習発表会
- 3月 晴れて卒業

【人員構成・場所】

- ◎教員：教授18名 准教授15名 講師2名 助教13名
居室/理学部1号館他(2025年1月1日現在)
- ◎学生：3年生32名
4年生35名
学生室/理学部1号館(2025年1月1日現在)

【時間割例(S1、S2ターム)】

◎3年	(限)	月	火	水	木	金
1	講義	講義			講義	講義
2	講義	講義	講義			講義
3	計算機演習	演習	計算機演習	計算機演習	計算機演習	演習
4						
5						講義

◎4年	(限)	月	火	水	木	金
1				講義		講義
2	講義	講義	講義	講義	講義	講義
3	講義		特別演習	特別演習		講義
4	講義					特別演習
5	講義				講義	



新入生歓迎会



観測実習



地物実験



4年生特別研究発表会
Photo: Koji Okumura (Forward Stroke Inc.)



卒業式



篠田 晴 (2024年度学部3年)

地球惑星物理学の魅力は、好きな分野を探したり自分の興味を深掘りするためのゆとりがあることだと思います。カリキュラムについては、好きな分野に関連する講義に絞ることも、幅広く色々な講義を受けることも可能です。また教員数に対して学生数が比較的小さいこともあり、先生方との距離が近いことも特徴の一つです。直接先生に質問や相談をする機会が豊富にあります。学生は、地物らしいゆとりを持ちながらも、地球科学に対する熱い気持ちを抱いている人が多い印象です。

私はもともと気象に興味があったので地球惑星物理学科への進学を決めました。演習・実験やフィールドワーク、最先端の内容も交えたワクワクする講義を受けているうちに、地震や宇宙といった他の分野にも興味を持つようになりました。地物に入ってから自分に合う好きな分野を探していく、というのでも全く遅くはありません。物理学の力を借りて地球や宇宙に潜む謎を解き明かすという、ここでしか出来ない冒険と一緒に乗り出してみませんか？



竹下 潤 (2022年度学部3年)

私は高校時代までは地学にあまり関心が無かったのですが、前期教養課程で受けた宇宙や地球についての授業が面白かったことをきっかけに、進学を決めました。授業は座学の他、プログラミング実習や物理実験、さらには、野外でのフィールドワークなど多岐に渡り、さまざまな視点から自然現象にアプローチすることができます。カリキュラムにはゆとりがあるので、運動部に所属していても無理なく学業と両立することができる上、興味に応じて他学科の授業を柔軟に履修することもできます。

先生や学生同士との距離が近く、気軽に質問や雑談をしたり勉強会を開いたりしやすい環境なもの、魅力の一つだと思います。私はプログラミング初心者でしたが、3Sの実習では先生やTAの方々にすぐ質問できたので、挫折せずに続けることができました。想像以上に自由度が高く、周りのレベルも高い学科ですので、地物学科に進学して正解だったと思います。



橋爪 宏幸 (2022年度学部3年)

私が地物で感じた魅力は、様々な分野の講義を自分の興味に合わせて非常に幅広い選択肢を持って受講できることです。地物開講の講義は勿論、同じ理学部の物理学科や地球惑星環境学部の講義も数多く選択することができます。幅広い分野にわたって選択することも、興味のある分野に集中して選択することも可能です。また学生同士の距離が非常に近いです。丹沢巡検や実験・演習など学生同士が協力して学ぶ実習科目が沢山あり、学部生用に控室も用意さ

れているので、学生同士で交流する機会が多いです。教員やTAの先輩方との距離も非常に近く、例えば、プログラミング演習では、懇切丁寧な指導のおかげで予備知識がなくても理解できるようになりました。また学科インターンや研究室見学を通じて最先端の研究に触れることができ、沢山の刺激を受けられます。これほど自己研鑽に励むことができるコンテンツが充実した学科は他にないと思います。地物で楽しく充実した毎日をぜひ！



妹尾 梨子 (2021年度学部3年)

私は宇宙と地学が好きだったのでこの学科に入りました。地球惑星「物理」学科だけあって授業や実験は物理がメインですが、巡検や観測実習に行く機会等もあり、物理を専門に地学について考えられるようになる学科です。物理が得意な私でも、授業で先生やTAさん、学科同期に教えてもらって、物理の力を伸ばせています。地球惑星物理学科は、宇宙惑星、大気海洋、固体地球といった幅広い分野をカバーする学科で、多様な視点から自分がやりたいことにつ

いて考えられるようになります。宇宙関連であれば、探査機の観測機器開発や探査機のデータを用いた研究や数値シミュレーションを用いた宇宙のプラズマに関する研究などに強いです。この学科には同じ学年の人たちが集える学生控室があり、お喋りしたり一緒に勉強したりできてとても楽しく、違う分野に興味のある人と話すことで刺激も受けられて、充実した学生生活が送れます。ぜひ地物と一緒に学びましょう！

さまざまな分野が活躍の場です。

大学院修士課程

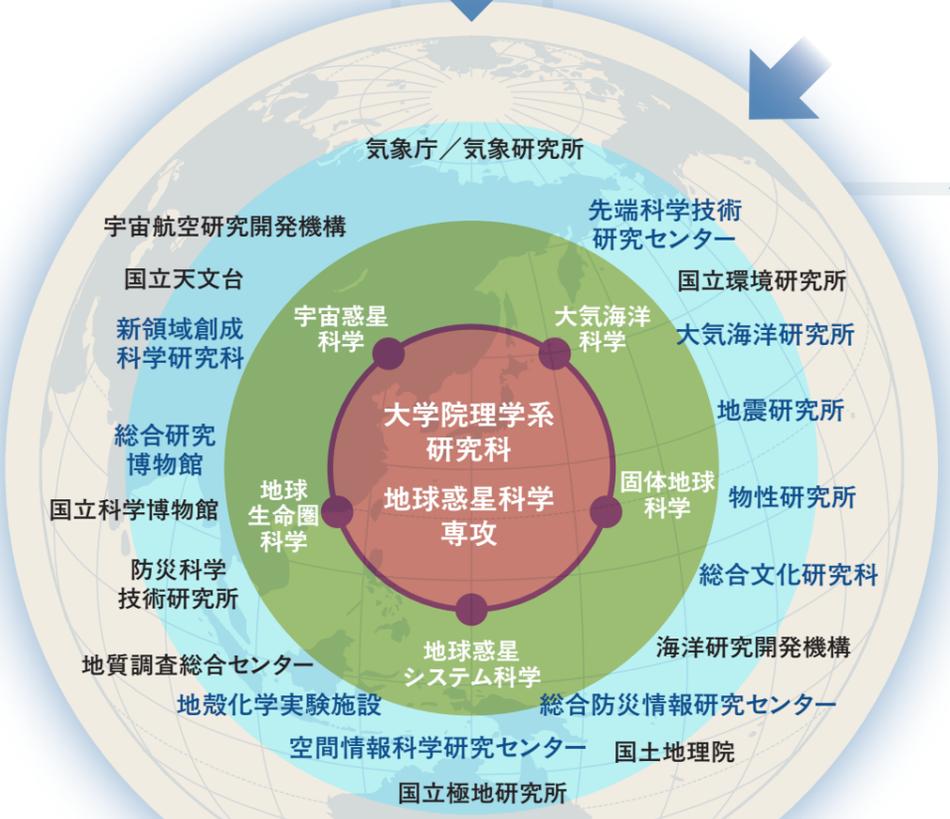
地球惑星科学専攻は、日本の地球惑星科学の中核となるべく、5つの講座が連携し、多くの学内組織や他の研究機関とも密接に協力しながら、研究教育活動をおこなっています。修士課程では地球惑星科学に関する研究を通じ、幅広い専門知識と研究能力の習得を目指します。

地球惑星環境学科

地球惑星物理学科

多くの卒業生は本学大学院地球惑星科学専攻に進学します。地球惑星科学専攻には、地球惑星環境学科の学生も進学し、研究対象や手法が多様になります。

年度	23	22	21	20	19	18	17	16
国内大学院進学 (内、本専攻)	29 (28)	30 (28)	31 (30)	28 (24)	31 (27)	28 (28)	34 (34)	28 (27)
民間・官公庁	0	0	1	1	1	2	1	2



大学院博士課程

修士課程修了者の約3割が博士課程に進学します。さらに広い視野と深い専門知識を培い、豊かな創造性を持つことが求められます。

民間・官公庁・独立行政法人

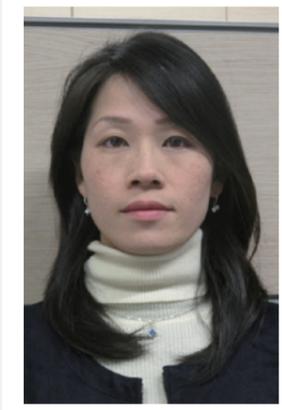
環境変動予測、防災型社会設計、環境保全・診断といった職種の登場もあり、地球惑星科学に関する高度な専門知識を持つ人材の必要性が高まっています。

[官公庁・独立行政法人]
宇宙航空研究開発機構、海洋研究開発機構、環境省、気象庁、国際協力機構、国立科学博物館、総務省、東京都庁、日本気象協会、農林水産省、文部科学省、NHK など

[民間]
伊藤忠、ウェザーニューズ、NEC、NTT、(株)オービック、コニカミノルタ、(株)コメット、ゴールドマンサックス、新日鉄、新日本石油開発、大成建設、電通、東芝、日本生命、野村證券、パソコ、パナソニック、日立、富士通、三井住友銀行、三井造船、三井物産、三菱スペース・ソフトウェア、三菱東京UFJ銀行、三菱電機(株)、三菱UFJモルガンスタンレー証券(株)、JX金属(株) など

大学・研究機関

博士課程修了者の多くが、国内外の大学や研究所などで先端的な研究を行い、研究者として活躍しています。



羽角 華奈子

大成建設株式会社
技術センター 土木技術研究所
水域・環境研究室
海洋水理チーム 主任

■略歴
[2003年3月]
東京大学 理学部 地球惑星物理学科 卒業
[2009年3月]
東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 博士課程 単位取得退学

学部演習で海洋に興味を持ち、大学院では観測船に乗ってアラスカからハワイ、タヒチまで太平洋のさまざまな地点で海洋深層の乱流混合を計測していました。そこから一転、現在は建設会社の技術研究所に勤務しています。

会社では、防災上の観点から重要な防潮堤の設計時に必要となる津波の波力や津波による水位変動を検討したり、作業船ナビゲーションシステム等の建設現場で役立つICT技術の開発を行ったりしています。入社当初は地球物理とスケールが大きく異なり、戸惑いもありましたが、扱うものは同じ流体。日々勉強しながら続けています。皆さんにもこのように様々な分野に関わっている地球物理現象の解明を楽しんでいただけたらと思います。



卜部 佑介

気象庁
地球環境・海洋部 気候情報課
異常気象情報センター

■略歴
[2009年3月]
東京大学 理学部 地球惑星物理学科 卒業
[2011年3月]
東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 修士課程 修了

気象庁の所管事項は、日々の天気その他、エルニーニョ現象に代表される気候変動、地震・火山、更には観測船や気象衛星など多岐に渡り、自分の専門はもちろんのこと、それ以外の分野についても幅広く学び、第一線の研究に触れることができる地球惑星物理学科での経験が有形無形の財産としてとても役に立っています。実際、気象庁では私以外にも大勢の卒業生が本学科で学んだ経験や知識を背景に活躍しています。現在は異常気象をもたらす大気循環場の監視・解析と情報発表に携わっており、世界各地でその姿を変えながら我々の生活に影響を及ぼす気候システムの複雑さと、適切な情報の発表・活用によって災害を軽減し、恩恵を得る機会を増やしていくことの重要性を実感しながら日々の業務に取り組んでいます。

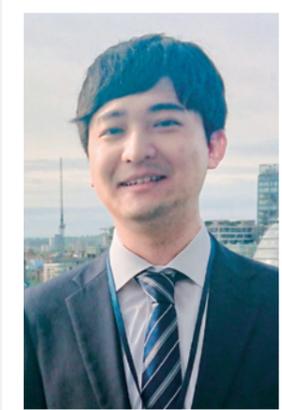


麻生 尚文

東京理科大学 先進工学部 物理工学科 講師

■略歴
[2010年3月]
東京大学 理学部 地球惑星物理学科 卒業
[2015年3月]
東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 博士課程 修了 博士(理学)

物理工学科の教員として地震物理学に取り組む中で、地球惑星物理学はまさに物理学そのものだと強く実感しています。また、私が勤務する大学には地球科学を専門とする学科がないため、地球惑星物理学を体系的に学べるのは東京大学ならではの感覚です。そうした意味で、地球惑星物理学の魅力は、地学が初めてでも幅広く学べること、そして、物理的・数理的な思考力を武器に、地球惑星科学の最先端へ一気にジャンプできることにあります。物理と地学をつなぐ学問の架け橋となり、地球の真理を探求する、そんな役割を果たすのが、地球惑星物理学科なのではないでしょうか。



河田 裕貴

三井住友海上火災保険株式会社
リスク管理部

■略歴
[2017年3月]
東京大学 理学部 地球惑星物理学科 卒業
[2019年3月]
東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻 修士課程 修了

私は修士課程で台風の研究に取り組んだ後、損害保険会社に入社して自然災害リスクの分析・評価を担当しています。損害保険会社は、自然災害を含む日常に潜む様々なリスクを引き受け、保険契約者が被災した場合などに補償を提供することが使命です。昨今では、地球温暖化の影響により、自然災害の発生頻度や強度がどのように変化していくのかといった観点での分析・評価が重要な課題となっています。

このような自然災害リスクに関する諸課題に対応していく上で、地球惑星物理学科で学んだ気象学や地震学の知識はダイレクトに活かすことができますし、研究活動を通じて培った仮説を立てて検証する論理的思考力は、リスク評価を行う上で非常に役立っています。

EARTH & PLANETARY PHYSICS



国立大学法人

東京大学理学部 地球惑星物理学科

〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1 理学部1号館8階事務室

Tel. 03-5841-4501

<https://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp/epp/>

soudan-tibutsu@eps.s.u-tokyo.ac.jp

[発行日]2025.3:地球惑星物理学科広報委員会