



The University of Tokyo

Earth & Planetary Physics



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

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 [FAX] 03-5841-8791

[URL] <http://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp/epphys/index.html>

[E-mail] soudan-tibutsu@eps.s.u-tokyo.ac.jp

画像は、以下の機関にご提供いただきました。

大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台、米国家航空宇宙局、
国立研究開発法人海洋研究開発機構、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

発行日：2020.3 地球惑星物理学科広報委員会

The University of Tokyo

Earth & Planetary
Physics

東京大学理学部
地球惑星物理学科

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



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



東京大学 大学院
理学系研究科・理学部
SCHOOL OF SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO

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。

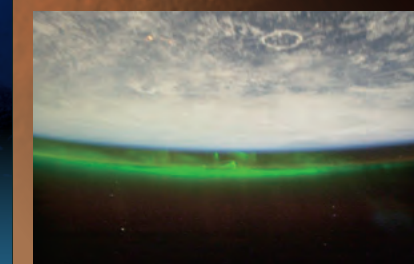
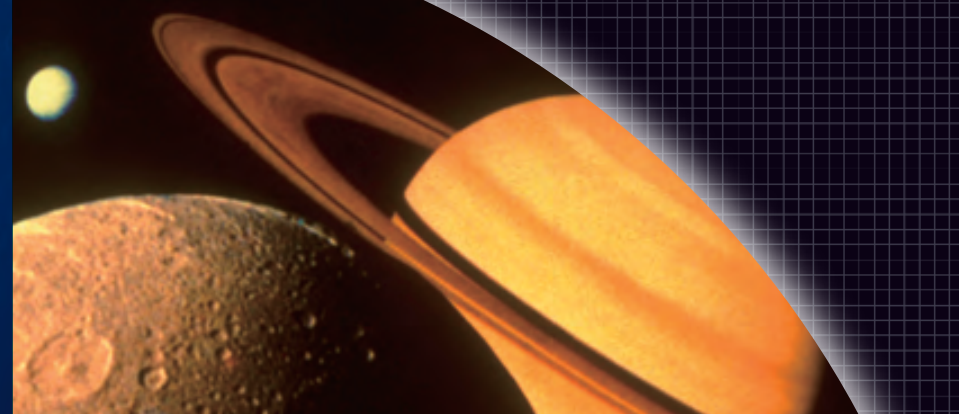
地球や太陽系は広大な宇宙の普遍的な存在なのでしょうか、それとも、特殊な存在なのでしょうか。私たち生命が地球に誕生し、進化してきたことは必然だったのでしょうか、偶然だったのでしょうか。「私たちはどこから来てどこへ向かうのか」という人類の究極の問いへの答えを地球惑星物理学は明らかにしようとしています。

- P.03 地球惑星物理学科の研究 [大気・海洋分野]
- P.06 地球惑星物理学科の研究 [固体地球分野]
- P.09 地球惑星物理学科の研究 [惑星・宇宙分野]
- P.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]
- P.13 地球惑星物理学科の教育 [カリキュラム・4年生演習]
- P.15 学生生活・在学生からのメッセージ
- P.17 卒業後の進路・卒業生からのメッセージ

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、集中豪雨や旱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。



Atmosphere&Ocean 大気・海洋



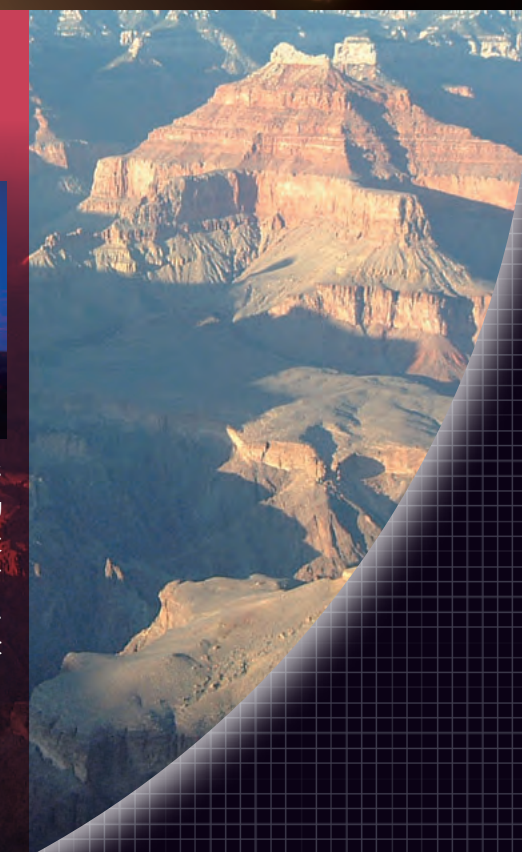
Planets&Space 惑星・宇宙

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。

太陽系には実に多様な惑星が存在しています。水をたえ、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か。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。

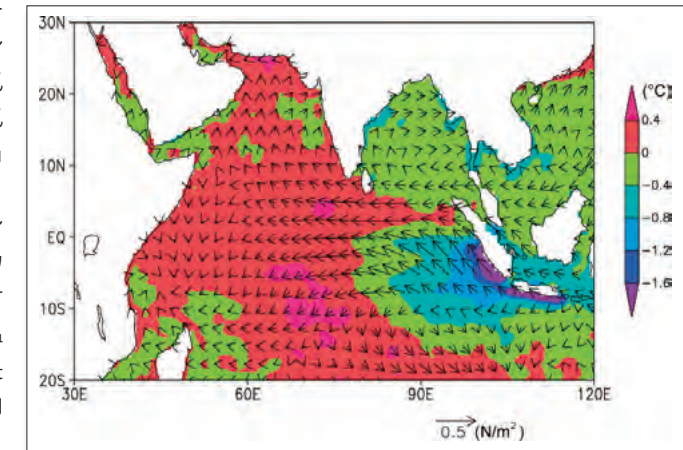


異常気象を引き起こす気候変動現象



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

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。

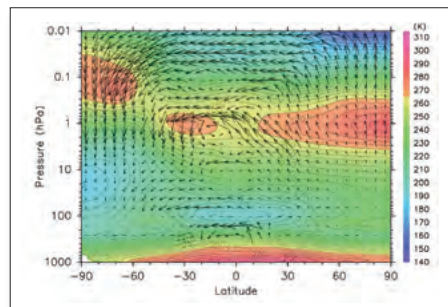
高さおよそ10kmから100kmの中層大気(成層圏、中間圏、下部熱圏)は、様々な波動と不安定、大循環が支配する領域です。大気重力波やロスビー



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)

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。



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(6月)。

深海の謎への挑戦

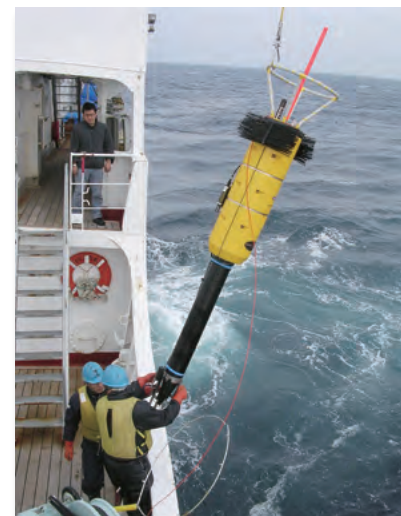
— 深層海洋大循環は「月」が駆動している!? —



北大西洋北部および南極海において沈み込んだ毎秒約2千万トンもの海水が、世界中の深層を約1500年かけて巡った後、北太平洋やインド洋などで表層に上昇し、極域へと戻っていくというグローバルな海洋循環が存在すると考えられています。しかしながら、その正確な駆動・維持のメカニズムは未だ謎に包まれています。

この深層大循環の維持に重要な役割を果たす候補として考えられているのが「深海乱流」です。乱流とは、例えば、コーヒーにクリームを入れてスプーンでかき混ぜるときに発生する小さな渦のことです。実際の海洋中でも、深層に至るまで、ミクロな乱流が存在しています。この乱流は海水をかき混ぜ、太陽日射による熱を表層から深層へ伝える役割を果たします。その結果、冷たい深層水が次第に暖められ浮力を得て表層に上昇することで、深層大循環が維持されるというシナリオです。乱流を起こすには、カップの中でスプーンを動かすような何らかのエネルギー源が必要ですが、深海でのそれは、主に「月」の引力であることがわかってきました。月の引力で誘起された潮汐流が海嶺や海山にぶつかる、その下流側で乱流が発生するのです。

我々は、深層大循環の数値シミュレーションに向けて、超深海乱流計(写真)による深度6000mまでの乱流強度の観測を行ってきました。しかしながら、現在までのところ、この深海乱流のグローバル分布を数値モデルに組み込んでみても、毎秒2千万トンの流量を伴うような深層大循環は再現できていません。未発見の乱流ホットスポットがどこに残されているのか、それとも、深層大循環を維持する乱流以外のメカニズムが存在しているのか…。皆さん、この海洋物理学に残された最大の謎解きに挑戦してみませんか？



超深海乱流計を使った海洋観測。水深6000mまで自由落下しながら数cmスケール以下のミクロな乱流の強度を測定します。

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依っ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。

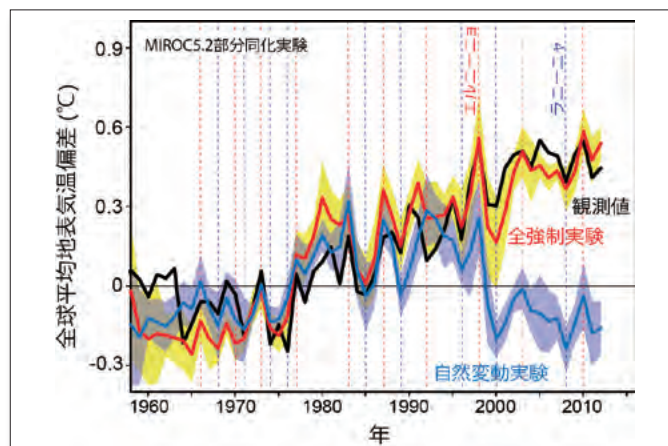


地球温暖化に伴う気候システムの変化

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すると、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年々からのずれ。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。

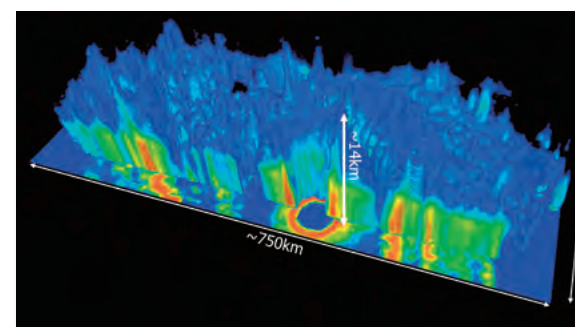


台風の新たな描像へ —身近な現象に秘められた多彩なプロセス—

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。



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。



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

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は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。



超高压物理

天体の内部には超高压・高温の世界が広がっています。例えば、地球の中心は360万気圧・6000度、太陽系最大の惑星である木星の中心は5000万気圧・2万度にも達します。そのような超高压・高温環境下における物質のふるまいが、われわれの暮らす地球表層環境におけるそれと大きく異なることは容易に想像できるでしょう。これを室内実験や物性理論計算によって理解しようというのが超高压物理学です。例えば、太陽系に最も多く存在し、地球表層環境では二原子分子気体として存在する水素は、木星内部では分子解離を起こし、単原子の液体金属として存在すると考えられています。周期律表において水素と同族のLi、Na、K、Rb…はアルカリ金属と呼ばれます。超高压・高温環境において、水素は「アルカリ金属」としてふるまうと考えられているのです。

超高压・高温状態を実験室内に再現して、物質のふるまい(構造や物性)を観察することは容易ではありません。新しい実験技術を開発して、それまで不可能であった測定を成功させること、これが超高压実験の醍醐味です。図は、超高压実験に広く利用されているダイヤモンドアンビル装置です。



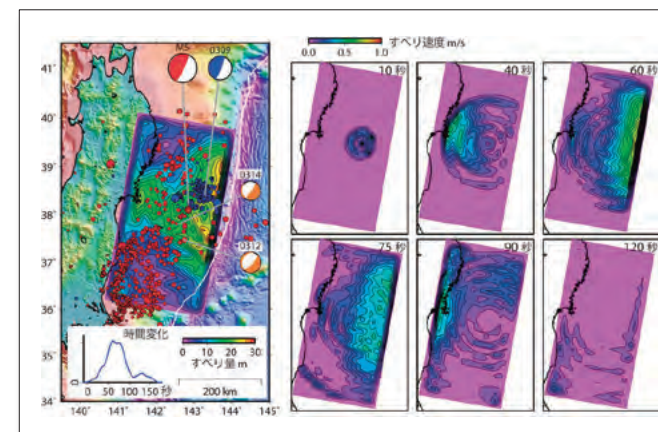
ダイヤモンドアンビル装置。片手で持てる程度のサイズながら、地球中心を超える400万気圧程度までの発生が可能であり、物理、化学、生物、地学の各分野において利用されている。



地震はどのように起きるのか？

日本是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。



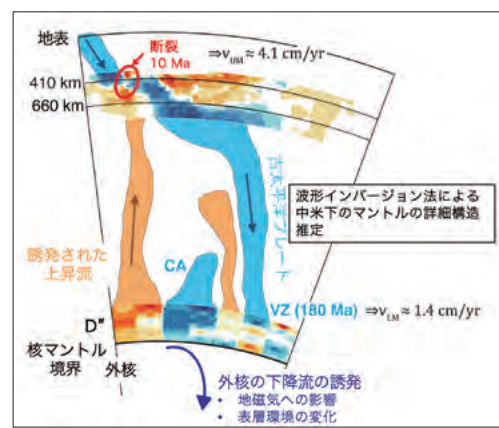
東北沖巨大地震(2011年3月11日)の破壊すべりプロセス。
(左)最終的なすべり量の空間分布。前震を青丸、余震を赤丸で示す。破壊すべりは150秒程度続いた。
(右)6つの時刻のすべり速度の分布。これらから破壊すべりの進展の様子が明らかになる。



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法」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。



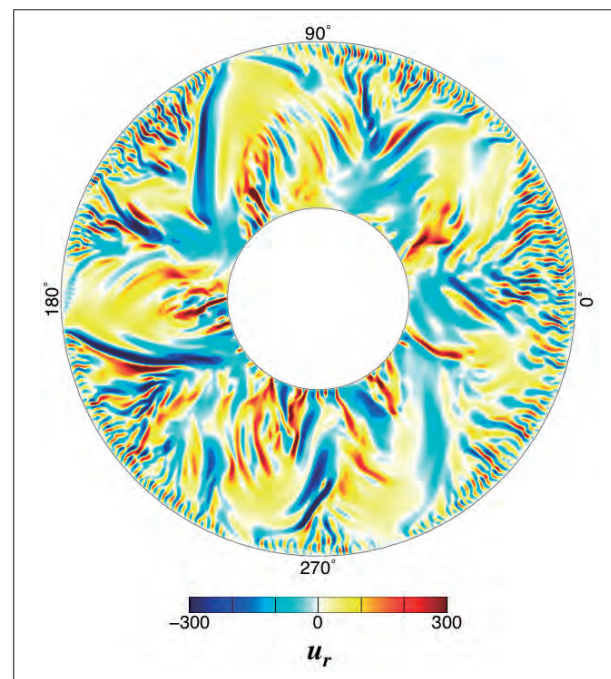
図中の青い領域は地震波の伝播速度が平均より早く、赤い領域は平均より遅いことを意味します。一般的に、高速度領域(図中の青い領域)は温度が(平均より)低い領域であるため、温度の低い過去に沈み込んだプレートと解釈できます。約1000万年前の地球表層でのプレート運動速度の変化に伴い約400 kmの深さで沈み込んだ海洋プレートが断裂していることがわかりました。また、マントル最下部には2億年前に海溝で沈み込んだ2つのスラブが到達していること、スラブの沈降に伴って高温の物質が受動的に上昇していることがわかりました。その結果、上下マントルで粘性率は約10倍異なることがわかり、これまで推定された値より小さく下部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)。



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、それをつくりだすメカニズムを知ること、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しますが、液体であるコアが冷却することにより、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。



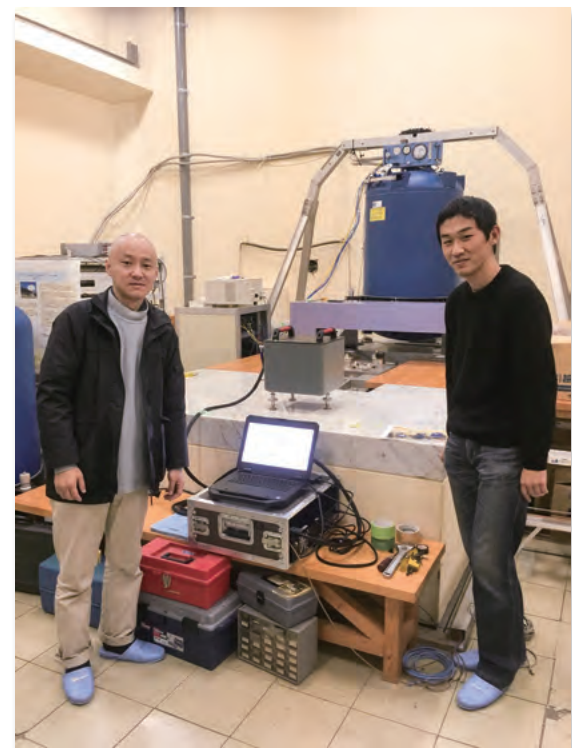
数値実験で得られたコア内部の熱対流のようす。赤道断面での流速の動径成分を色であらわす(赤が上昇流で、数値は磁気レイノルズ数)。内側の円は固体の内核の断面。はげしい乱流による電磁誘導によって電流が生成する。磁場が存在することで、波数6程度の大規模対流構造があらわれる。



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。

10 nm/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



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つてずれ動くという、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ます。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砕などの痕跡が、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。



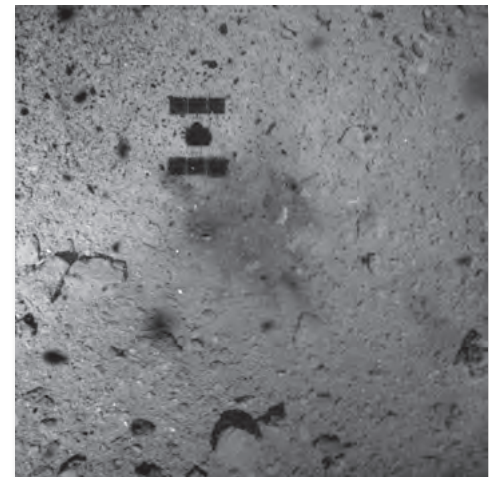
長野県北部の地震(2014年11月22日)で生じた地表断層。元々平坦な畑だったが、右側が逆断層運動により約85cm相対的に隆起した。

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、太陽光の弱く低温のOuter Solar System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)

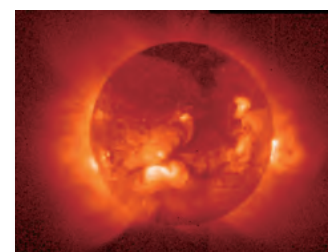
宇宙プラズマの普遍的理解



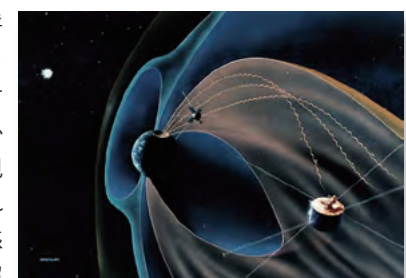
地球周辺の宇宙空間では、非常に希薄なガスが電離して「プラズマ」と呼ばれる状態になっています。人工衛星を飛ばしてこの宇宙プラズマを「直接観測」すると、さまざまなおもしろい現象が起きていることがわかります。地球近傍だけでなく広い宇宙空間の99%以上はプラズマで満たされているといわれていますから、このようなプラズマ現象を調べることで、宇宙での高エネルギー・プラズマ現象の物理に迫ることができます。たとえば、地球や惑星の周りには太陽風と呼ばれる数百km/sもの超音速プラズマの流れが太陽から吹いています。この流れが惑星磁場と衝突する箇所に衝撃波ができますが、そこでの粒子加速の理解が、超新星爆発衝撃波で生成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(磁力線つながり現象)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。

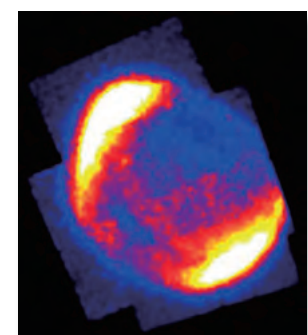
このようなフレア現象をはじめとする、太陽で観測されたダイナミックなプラズマ現象は、「活動的な宇宙」というあたらしい宇宙観をもたらしました。ブラックホールや生まれたばかりの星の周囲でも、おそらくは似たようなダイナミックな現象がおこっているに違いありません。



ようこう衛星による太陽のX線画像



地球磁気圏と探査衛星



超新星残骸SN1006のX線像(あすか衛星撮影：JAXA提供)

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うして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決まってくる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。



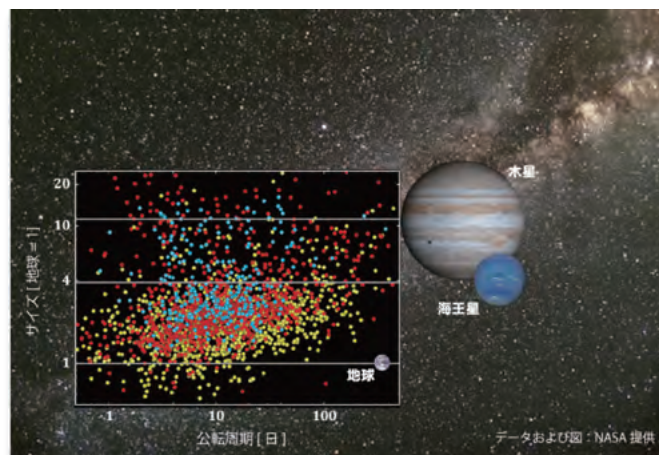
水星、金星、地球、火星

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700を超えています。また最近では、地上を離れて宇宙に望遠鏡を運び、宇宙での惑星探しが始まっています。最新報告によれば、さらに2000個近くの惑星候補があり、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、そこから系外惑星の起源について知ることもできます。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



飛翔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)。

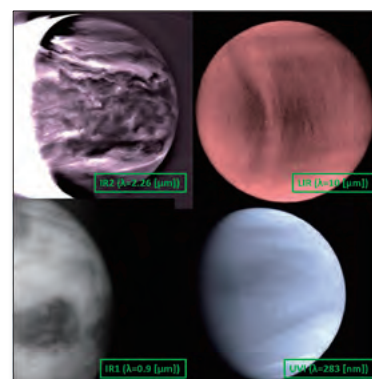


図2. 「あかつき」に搭載された4台のカメラ(IR1, IR2, LIR, UV)が捉えた金星大気の様子。観測波長ごとに異なる高度の雲の構造が見える。

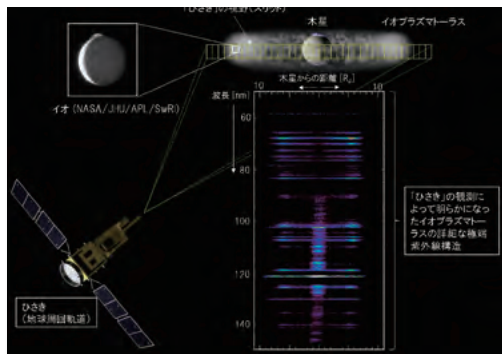


図1. 「ひさき」が捉えた木星周辺プラズマの極端紫外スペクトル

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年以上の長い歳月が必要で、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。科学目標を精鋭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3. 飛翔体搭載装置(フライトモデル)の開発風景



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られ、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詳細に観測し、太陽系初期につくられた小天体の名残であるリュウグウの起源や地質活動の理解に繋がるデータを得ました。持ち帰られるリュウグウの表面岩石の分析から、リュウグウの歴史、太陽系の歴史を解明することをめざします。さらには星や惑星系の形成場の天文観測も取り入れ、太陽系の誕生と進化を多様なアプローチで理解しようとしています。



「はやぶさ2」が探査した小惑星リュウグウ
(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)

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。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



計算機演習

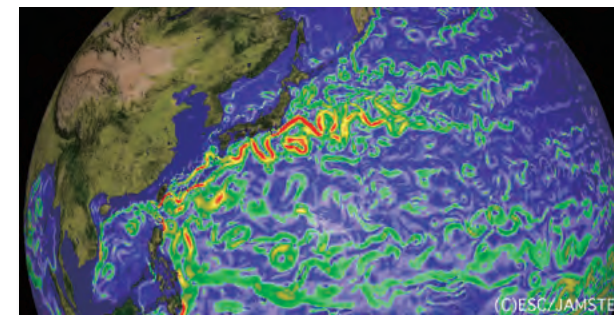
について数値シミュレーションを実行したり、最先端の大規模数値シミュレーションで得られたデータを解析したりする機会が与えられます。さらに大学院に進学すれば、「大気海洋」「固体地球」「宇宙プラズマ」など各分野の最先端の高度な数値シミュレーション手法についてより詳しく学ぶことができます。

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。

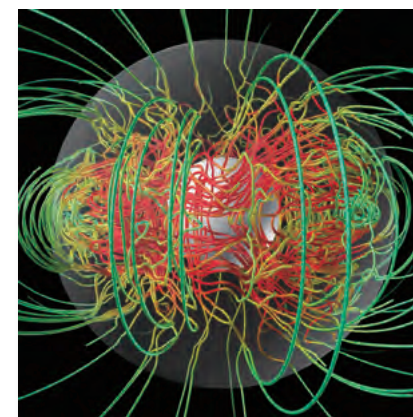


地球シミュレータ(提供: (独)海洋研究開発機構)

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。

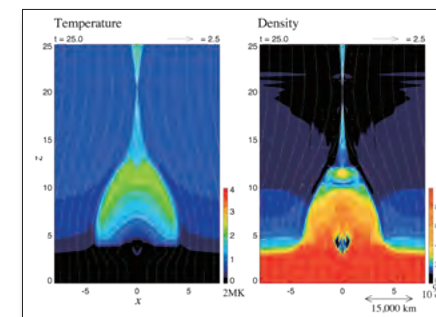


図提供: (独)海洋研究開発機構



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、太陽大気爆発現象フレア(10ページ・研究トピック16参照)の数値シミュレーションの結果で、磁場と高温プラズマとの相互作用を記述する磁気流体力学の偏微分方程式を連立して解



く大規模計算で得られたものです。磁気リコネクション(磁力線のつながりかえ)という物理機構で発生した熱エネルギーが、磁力線に沿った熱伝導により表面高密度大気に伝わり、急膨張によるプラズマ逆流を誘発して磁気ループを満たしX線を放射する様子が再現されています。実際、このような先端の尖った明るいループが衛星搭載望遠鏡で観測されています。

4年生演習

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】
地球の炭素はどこへ行ったのか?

堤裕太郎
[担当教員]廣瀬敬



内容 現在の地球に炭素はどれくらいあるのか?この答えを現在の地球から考えようとしても地球の深さ2900km以上にあるコアの物質を採取し、炭素量を直接決定することはできません。そのため、今回は地球のコア形成過程に注目してマグマオーシャンからコアが分離した条件における、マグマオーシャンとコアの間の炭素の分配を求め、地球全体の炭素量を推定することにしました。また、地震学的観測によると外核の密度は鉄よりも小さい(密度欠損)ことが知られており、この密度欠損を炭素の存在で説明できるのか今回の実験で調べました。実験では、ダイヤモンドアンビルセル装置の中に、コアとマグマオーシャンにそれぞれ対応する試料を入れ、それをコアが分離したとされる高压高温条件で反応させてサンプル内に小地球を作りました。その後、加熱箇所の断面を切り出して元素組成分析を行いました。その結果、地球の外核の密度欠損を説明できるほどの炭素はコアに入っていないことがわかりました。一方で、地球全体のうち約90%の炭素がコアに入っていることもわかりました。今後は他の軽元素が何なのか、地球のC/H比が地球の原材料とされる原始的隕石の値よりはるかに小さいのはなぜなのか、を明らかにしていきたいと考えています。

感想 特別研究は自分で行う初めての研究でした。地球の内部に関する知識が乏しく、要領も良くない私に、廣瀬先生をはじめとする研究室の方々が根気強く説明してくださいました。また、悩んでいるときに的確なアドバイスを頂き、自分がやっている実験の目標、意義についての理解がより深まりました。実験に関してはなかなか自分の思うような試料が作れませんでした。何とか結論に辿り着けました。今回の特別研究を通して、これから先の研究ですべきことがより明確になり、また研究の楽しさについても大いに実感できました。



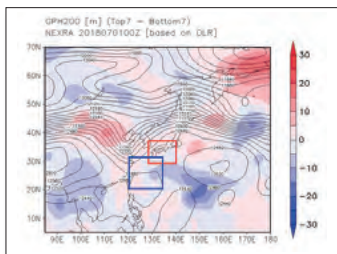
【テーマ】
NICAMを用いたアンサンブルシミュレーションによる平成30年7月豪雨の研究

池端耕輔
[担当教員]佐藤正樹・伊藤純至



内容 2018年7月上旬に発生した「平成30年7月豪雨」は、多量の水蒸気が入り込んだ西日本の各地で局地的な線状降水帯が発生するなどした結果、記録的な豪雨災害となりました。水蒸気流入が続いた要因として東シナ海の活発な対流活動が挙げられますが、対流活動が持続した理由は詳しく分かっていませんでした。また線状降水帯は防災の観点からも予測精度の向上が望まれています。この2点に注目し、本研究では全球雲解像モデルNICAMを用いたアンサンブルシミュレーションを行い、計算結果を統計的に解析しました。その結果、豪雨発生の約1週間前の対流圏上層における高気圧偏差が東シナ海の対流活動を刺激し、西日本で線状降水帯の発生可能性を向上することが分かりました。なお本研究で用いたアンサンブルデータは近年開発されたものであり、今後の利用促進にも資する研究となりました。

感想 平成30年7月豪雨の先行研究や線状降水帯に関する文献を読みながら、数値モデル・解析ツールの使い方の習得を同時に進めました。初めての大規模シミュレーションや大量の解析プログラムの自作に苦労する日々でしたが、成功した時はとても嬉しかったです。短期間で大きく成長した実感があります。考察は想像以上に難しく悩みましたが、先生方の熱心なご指導のもと何とか結論をまとめられました。4年間の学習の集大成として実りある特別研究でした。



対流活発化に関するコンボジット解析の結果。東シナ海の対流活動を活発にするのは、初期値の対流圏上層のどの領域の影響なのか調べたもの。この図は中国上空の気圧の峰・オホーツク高気圧の発達が重要だったことを意味する。

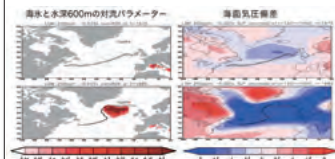
【テーマ】
大気海洋結合モデルシミュレーションによる水期中の気候変動要因分析

國吉優太
[担当教員]阿部彩子・シェリフ多田野サム



内容 地球の気候は約260万年前以降、氷床の拡大と縮小を繰り返し、約12万年前から2万年前までは氷床が発達した最後の「氷期」が続いていました。この氷期の時期に全球規模の影響を伴う急激な気候変化が北大西洋周辺域を中心に繰り返していた地質学的証拠が見つかっており、大気海洋の非線形的なモードシフトが重要だと考えられています。しかしそのようなモードシフトのメカニズムはまだ詳しく分かっていません。そこで今回は、大気海洋結合モデルで再現された水期中の急激な気候変動の解析を行い、その要因について研究しました。その結果、海洋内部の水温、塩分、密度の分布が変化することによって海洋深層循環が強い平衡解と弱い平衡解の間でモードシフトして急激な気候変動が引き起こされていることを確認しました。さらにモードシフトを決定づけるには風-海氷-対流の間のフィードバックと海洋内部の成層状態の両方の条件が整うことが重要であると示唆されました。

感想 特別研究にあたり、先行研究の論文を読み先生方と議論することを通して、研究の歴史の中で今の研究がどういう位置付けになり、自分の研究の意義や新規性は何かということを確認にする大切さを学びました。



急激な気候変動が発生する過渡期に着目した海水(太線)、対流、海面気圧偏差の図。対流再開前後に風-海氷-対流のフィードバックが作用する様子を表す。

解析を進める中で期待される結果が出ることはほとんどなく、試行錯誤しながら模索する日々が続きましたが、先生方と何度も議論を交わす中で何とか発表まで辿り着きました。この特別研究を通して、研究のいろはを学ぶことができて意義深い経験となりました。

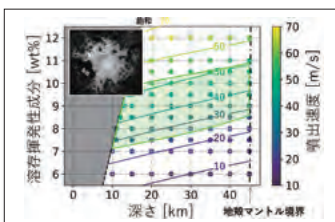
【テーマ】
小惑星セレスの炭酸塩噴出モデルと地下構造の推定

湯本航生
[担当教員]杉田精司・長勇一郎



内容 生命や水の起源は何か?どのように惑星は作られ進化するのか?小惑星は太陽系形成初期の微惑星の生き残りであると考えられているため、このような問いに答える上で重要な手がかりを記録している可能性があります。特にセレスという小惑星は表面に有機物や炭酸塩が点在しており、内部で熱水活動があった強い証拠となっていますが、地下の組成についてはまだよく分かっていません。そこで私の研究では、地球の火山をヒントにこれらの炭酸塩が噴出するモデルを検討しました。次に、過去に探査機が撮影した画像から噴出速度を予想し、モデルを用いて噴出元となる地下塩水の状態を制約しました。今回の研究から地下塩水の深さや揮発性成分量について推定を行うことができ、更にそのような地下構造が実際に存在したことを支持する結果となりました。この研究を元に、将来のセレス探査ミッションの計画立案に向けて探査機に搭載するカメラのスペックに関する提案も行いました。

感想 特別研究ではテーマを決めたり、手法を考えたりするところから研究の進め方や姿勢について学ばせていただきました。セレスの地下構造という未知な対象の解明に向けて暗中模索する中で、先生方から鋭くかつ丁寧なご指導をいただきました。特に先生方との議論の中で自分が想像もしていなかったことや理解が不十分であった点をご指摘いただき、それらを乗り越えていくうちに自分の論理の弱い部分や曖昧さが改善され方針が固まっていくのを実感することができました。



深さと溶存揮発性量を変えてモデル計算を行った際の噴出速度のプロット。緑で囲った領域が観測と整合的であり、今回の研究の制約結果である。左上はドーム状に噴出した炭酸塩の地形モデル(Buczkowski et al., 2018)。

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え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的概念と関連する諸現象、及び概念の歴史的発展を解説する。
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Schrödinger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。	地球惑星内部物質科学 地球惑星内部の高温高压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】	気象学 地球大気の特徴を概観した後、水の相変化、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、地球表層-内部間での物質循環と地球環境進化の関係を理解する。
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。	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】
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。	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や進化の解説を行う。	地球惑星物理学特別研究 特定の研究課題を選び、その課題を主体的に解決することを目的として実習を行う。
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關わる物理過程、及び過去・将来の気候変化の仕組みを理解する。	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。	
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わりについて解説する。	地球惑星システム学基礎論 地球・惑星を構成する各圈の特徴と相違点、各圈間の相互作用と発展について解説する。	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。	【必修科目】
地球惑星物理学概論 地球科学的なものの見方、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 プラズマ諸現象を電磁流体力学・プラズマ運動論の基礎過程とともに解説する。	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過程を学習する。	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。
情報数学* 集合・関係・束、情報理論、代数(群・環・体)とその情報科学的应用を学ぶ。	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。	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。	
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。	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】
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際に必要な数値計算・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。	臨象理学実習 人類社会の未来に関わる諸課題に関して広い視点から現場で学び、主体的に考えるための実習を行う。
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して、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。	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。	
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。	【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。			地球惑星物理学特別演習 英文の論文・教科書の講読を行い、講読内容の理解を助けるための実習を行う。	

必修科目

選択必修科目

選択科目

※：他学科開講科目

カリキュラム

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。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。

在学生からのメッセージ

海老原 樹(2018年度学部3年)

わたしは、特にこれがやりたい!という分野を持たずにこの学科に入りました。ですが、宇宙の星々の形成から地球の気象や地震まで、幅広くかつ専門的でもある授業を受けてみて、自分の視野が広がりました。先輩との距離感も近く、いろいろなアドバイスをいただけており、今は自分の専門分野を決めている真っ最中です。わたしは、現在運動会に所属していますが、授業はレポートと試験が半々

くらいで、試験期間が忙しくなりすぎることもなく、両立しやすいと感じています。学科単位のイベントも多く、学部生が主体となって運営するものもあるので、一緒に授業をうけるだけの関係ではない、高校のクラスのような一体感のある学科です。この学科に興味を持っている方は、ぜひ僕たちが運営している五月祭の地物の展示会に来てみてください。

増田 未希(2018年度学部3年)

地球惑星物理学科は、宇宙、大気海洋、固体地球の3つの分野が1つの学科にまとまっている形なので、理論やシミュレーション、観測機器開発、実際の観測など、幅広い分野について学ぶことができます。また、演習系の授業では大学院生がTAとしてアドバイスしてくれたり、地物総会という集会や観測実習後の飲み会があったりと、学部生が先生方、院生とも仲良くなれる学科です。さらにアドバイザー制度など

もあり、単位や研究室選び、単なる興味についても相談してくれたり、学部生、院生向けのセミナーもあったりと、進みたい分野が決まっている人にも決まっていな人にも先生や研究室について情報を得る機会がたくさんあります。学科内でほとんどの人が同じ授業をとり、五月祭は4年生主体になって分野ごとに展示をするので、同学年、先輩後輩間の交流もあります。ぜひ地物と一緒に学びましょう。

千田 拓史(2017年度学部生3年)

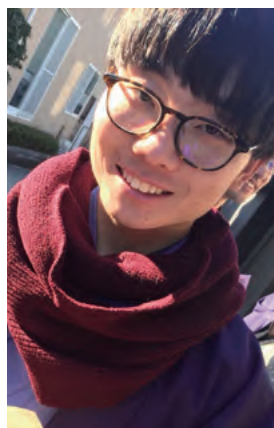
地球惑星物理学科は気象や地震など、私たちの身近な現象について物理的に探究する学科です。地球に関する様々なことを幅広く扱うので、現時点で自分のやりたいことがはっきり決まっていない人も、この学科の多種多様な授業を受けていく中で必ず興味の持てる分野が見つかると思います。一学年の人数も30人程度と少なく、同期とは気づけば高校のクラスのように仲良くなってい

ます。夏には泊まり込みで行う実習があり、冬には地球惑星物理学科全体での地物総会があるので、同期だけでなく先輩や先生方とも関わる機会がたくさんあります。地球科学について少しでも興味のある人にとってはきっと刺激的で楽しい日々になると思いますよ!ぜひ私たちと一緒に学びましょう!

西條 祥(2017年度学部生4年)

地球惑星物理学科のアピールポイントの一つは、学習内容の多様性にあります。大気海洋・宇宙惑星・固体地球の分野を跨ぐ学部の授業は、専門的ながらバリエーションに富んでいて飽きることがありません。研究分野を絞る前に各分野を満遍なく学ぶことができるのは、東大地物の大きな特長でもあります。さらに、地学に関連する授業として物理や数学といった理論系、プログラ

ミング、観測や実験など幅広い内容を程よい歯応えでこなせるのも魅力です。研究室の選択肢も非常に多い上に学部生室も居心地が良く、後期課程の学習環境としては最高級だと思います。恵まれた環境で多くを学ぶうちに自ずと興味の分野が定まり、理学の面白さに引き込まれていくことでしょう。地学を志す人には勿論、興味や進路を模索している人にも是非お勧めしたい学科です!



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

【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15名 准教授15名 講師1名 助教9名
居室/理学部1号館他(2020年1月1日現在)

◎学生: 3年生31名
4年生34名(定員32名)
学生室/理学部1号館(2020年1月1日現在)

【時間割例】

◎3年

	月	火	水	木	金
1					
2					
3	演習	演習	演習	演習	
4	実験		実験		講義

(限)

◎4年

	月	火	水	木	金
1					
2					
3					
4		特別演習			特別演習
5					

(限)

地物で学んだ知識を直接的に役立てる機会は少ないですが、研究を通して学んだ、様々な現象を観察し、仮説を立て、検証するという考え方は、アクチュアリーとして働く上でとても役立っています。