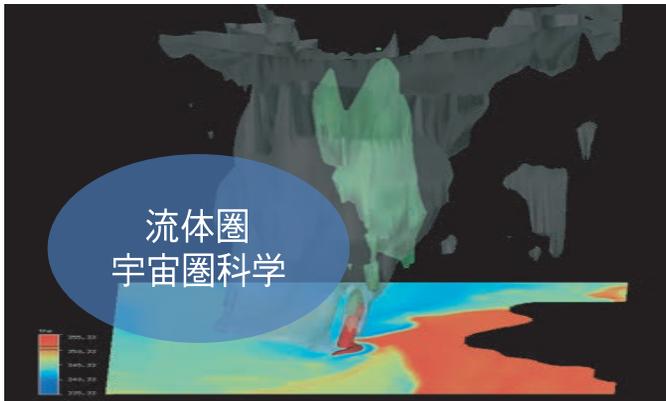


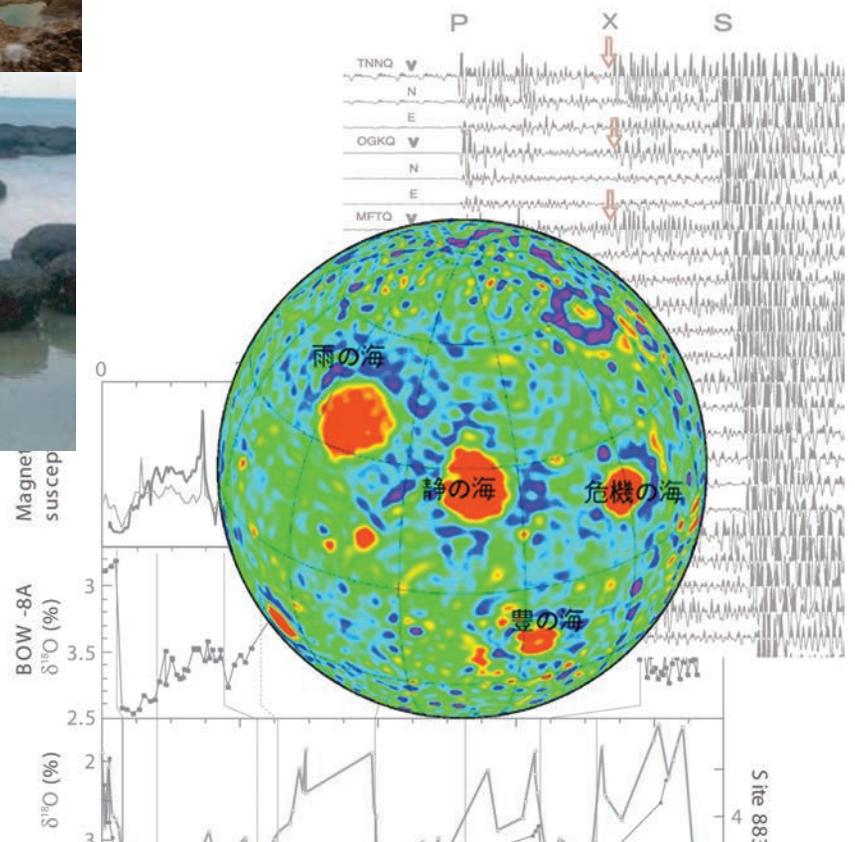
九州大学大学院理学府

地球惑星科学専攻

研究分野 説明資料集



私達の目指すサイエンスは
なぜ面白い？



九州大学大学院理学府 地球惑星科学専攻

Department of Earth and Planetary Sciences,
Graduate School of Science, Kyushu University

福岡市西区元岡744 九州大学大学院理学研究院

TEL: 092-802-4209

mail: senkocho@geo.kyushu-u.ac.jp

homepage: <http://www.geo.kyushu-u.ac.jp/>

2024/4 作成版

九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻 研究グループ説明資料集 目次

地球惑星科学専攻の概要	1-2
-------------	-----

流体圏・宇宙圏専門分野 3-4

太陽地球系物理学	5-6
宇宙地球電磁気学	7-8
大気圏電離圏融合宇宙天気科学	9-11
大気流体力学	12-13
大気流体モデリング	14-15
気象学・気候力学	16-18

固体地球惑星科学専門分野 19-20

地球深部物理学	21-22
地球内部ダイナミクス	23-24
岩石循環科学	25-26
地球進化史	27-29
古環境学	30-31
火山科学	32-33
観測地震・火山学／地震火山減災科学	34-35

太陽惑星系物質科学専門分野 36-37

惑星系形成進化学	38-40
有機宇宙地球化学	41-42
地球システム化学	43-44
地球内部物質学	45-46

地球惑星博物学 47-48

地球惑星科学専攻の概要

地球惑星科学専攻 専攻長

地球惑星科学とは？

学問分野の名称として地球惑星科学という言葉が使われるようになったのはそれほど古いことではありません。それまで個別に進められてきた地球物理学、地球化学、惑星科学、地質学など諸分野の研究が互いに連携し、地球惑星の過去・現在・未来を探求することをめざして 1990 年代初期に創成された学問領域です。九州大学は他に先駆けてそのような学問領域の重要性を認識し、1992 年に地球惑星科学専攻を国内で最初に発足させました。

地球惑星科学専攻がめざすもの

わたしたちは地球惑星という巨大な複雑系の起源・進化、現在の姿、将来像そして長い時間スケールで発生するそれらの相互関係を理解することをめざしています。そのためにはまず問題点の発見に始まって、研究を立案・計画することが必要です。つぎに観測・調査、分析、実験、理論、解析などさまざまな手法を駆使して問題にチャレンジしていきます。そして得られた成果を世界に向けて積極的に発信し、研究をさらに発展させることが求められます。九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻は、こうした一連の研究過程を進めていくなかで、独創的能力をもつ研究者、豊かな教育能力を備えた教育者、社会全般の中で生じる様々な問題解決を図る能力をもった高度な技術者・専門家を養成することを目的にしています。そのために、わたしたちは太陽・惑星、惑星間空間、宙空、大気、海洋、地球表層、地球内部などを対象として、幅広い視野に立った教育を行っています。

地球惑星科学専攻の構成

本専攻は4つの専門分野で構成されています。各専門分野は1～8 研究グループを含んでいて(次ページの表参照)、教員・大学院生が活発に研究活動を進めています。この説明会パンフレットには各研究グループの研究内容が紹介されていますので、詳細はそちらを見ていただくとして、太陽惑星系の形成から地球外物質、地球惑星磁気圏・電離圏から地球や惑星の大気圏、地殻表層からマントル・コアに至る地球内部、そして海洋、生物圏までの多彩な対象を研究する教員がみなさんの教育にあたります。

地球惑星科学にチャレンジしてみませんか

教育プログラムのページで紹介されているように、本専攻ではコースワークの充実に力を注いでいます。修士課程での研究を進めていくために欠かせない基礎的内容に絞った講義や演習を開講しています。それはより確かでゆるぎない基礎力を身につけ

ることこそが最先端をめざす研究者、厚い信頼を得る教育者、そして人類の未来を高度な技術で支える専門家の養成に必要であると考えているからです。ぜひ多くの方々が本専攻に入学し、わたしたちとともに自然界の複雑さに挑戦し、地球惑星のさまざまな問題や疑問を解決して行ってほしいと思っています。

令和6年度 地球惑星科学専攻の研究分野一覧

専門分野	研究グループ	教員			研究内容
		教授	准教授	助教	
流体圏・宇宙圏科学	太陽地球系物理学		渡辺 正和		太陽風-磁気圏-電離圏結合系における大域的プラズマ力学と各領域間相互作用過程の研究
	宇宙地球電磁気学	吉川 顕正	河野 英昭		太陽面から地球圏までの電磁気現象やオーロラなど宇宙天気現象の全地球的観測・解析・理論研究
	大気圏電離圏融合宇宙天気科学	Huixin Liu			地球惑星における大気圏・電離圏結合素過程(力学・化学・放射)の解明と宇宙天気予報への応用
	大気流体力学		中島 健介	野口 峻佑	中層大気やその上下大気との相互作用に関する研究、および惑星大気を含む地球流体に関する研究
	大気流体モデリング	三好 勉信			地球大気モデリング、中層大気及び超高層大気の数値シミュレーション、例えば大気大循環および大気波動に関する理論的研究
	気象学・気候力学	**川村 隆一	望月 崇	川野 哲也	気象、気候システムに関する研究、例えば熱帯気象、モンスーン、温帯低気圧、台風、シビアストーム、雲物理、異常気象、大気海洋相互作用、気候変動等の研究
固体地球惑星科学	地球深部物理学	**金嶋 聡	高橋 太		地震波動や地磁気の解析による地球深部構造と変動の研究
	地球内部ダイナミクス		吉田 茂生		地球内部構造と地球内部ダイナミクスの研究
	岩石循環科学	*寅丸 敦志	池田 剛	宮本 知治	変成岩を用いた地殻深部、上部マントルでの物理化学過程の研究。化学組成とそれに関連する理論に基づく岩石成因の解明
	地球進化史	尾上 哲治	清川 昌一	佐藤 峰南	野外地質学にもとづいた地球史を通じたテクトニクス/環境変動の解読、大規模な火成活動や天体衝突による生態系の応答と環境変動メカニズムの解読
	古環境学	岡崎 裕典			古海洋環境変動と海洋沈降粒子の研究
	火山科学	下司 信夫		大橋 正俊	野外地質調査、物質科学分析、室内実験、数値計算に基づくマグマ活動と噴火メカニズムの研究
	観測地震・火山学	※松本 聡	※相澤 広記 ※江本 賢太郎		地震及び火山現象の観測に基づく地震発生・火山噴火過程の研究
	地震火山減災科学	**※松島 健	※相澤 広記		地震・火山噴火災害の発災ポテンシャルを評価し、災害の軽減化(減災)に役立てる研究
太陽惑星系物質科学	惑星系形成進化学	町田 正博	岡崎隆司	山本 大貴	理論物理学的手法、数値シミュレーション及び地球外物質の分析による太陽系及び系外惑星系の起源・進化の研究
	有機宇宙地球化学	**奈良岡 浩	山内 敬明	北島 富美雄	有機物の前生命的合成や隕石有機物の解析による化学進化、古細菌の生物有機地球化学、有機物の同位体地球化学と生命環境
	地球システム化学	山本 順司	荒川 雅		地球の形成から現在まで、また、地球の深部から表層まで、化学の目で地球を四次元的に調べる研究
	地球内部物質学	久保 友明		坪川 裕美子	高圧変形実験による地球内部の動的現象の解明、マントル対流と深発地震、岩石の破壊と流動、非平衡相転移、AE測定と放射光その場観察、惑星氷、衝撃変成隕石
地球惑星博物学	地球惑星博物学	@伊藤 泰弘			化石生物の古生態と形態進化の研究

*令和7年3月末日定年退職予定

**令和8年3月末日定年退職予定

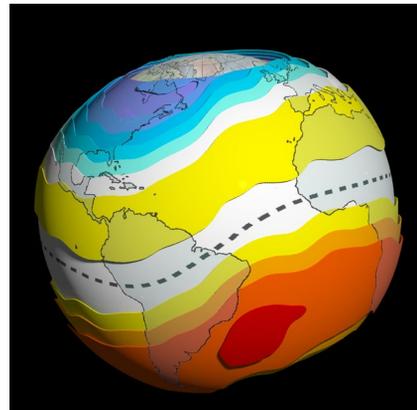
※は地震火山観測研究センター所属

@は総合研究博物館所属

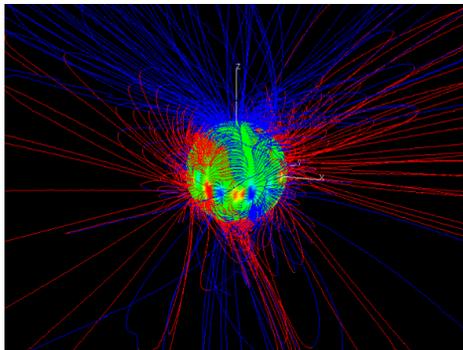
流体圏・宇宙圏 科学講座

- ・太陽地球系物理学
- ・宇宙地球電磁気学
- ・大気圏電離圏融合宇宙天気科学
- ・大気流体力学
- ・大気流体モデリング
- ・気象学・気候力学

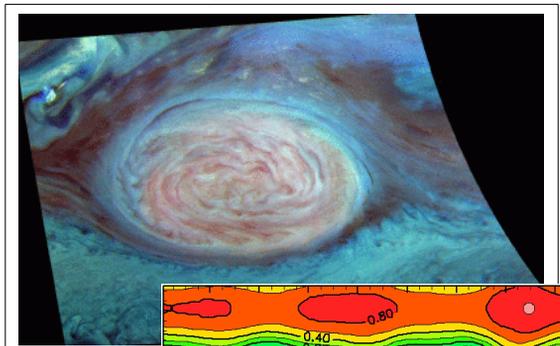
熱圏赤道異常



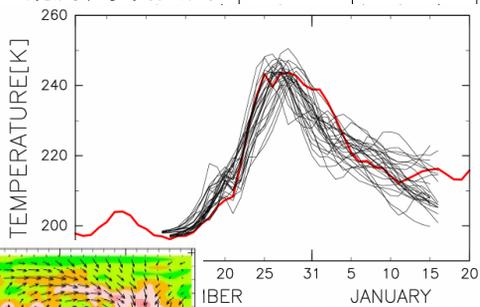
太陽近傍磁場のシミュレーション



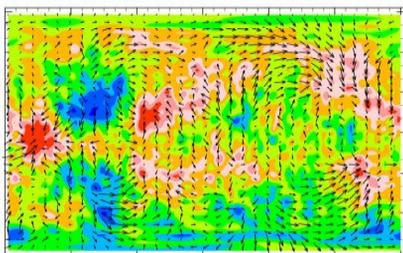
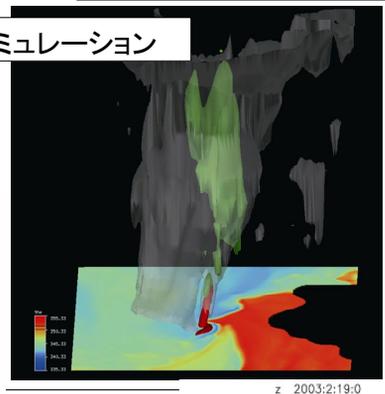
木星大気のシミュレーション



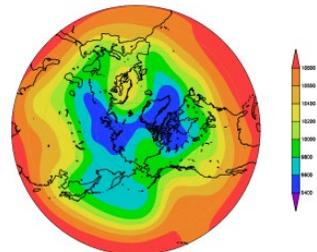
磁場のグローバル観測、宇宙天気



竜巻のシミュレーション



成層圏の予報
熱圏下部の流れ



異常気象(ブロッキング)

流体圏・宇宙圏科学 専門分野

各研究グループの研究内容の概略

研究グループ	研究内容
太陽地球系物理学	太陽風 - 磁気圏 - 電離圏結合系における大域的プラズマ力学と各領域間相互作用過程の研究
宇宙地球電磁気学	太陽面から地球圏までの電磁気現象やオーロラなど宇宙天気現象の全地球的観測・解析・理論研究
大気圏電離圏融合 宇宙天気科学	地球惑星における大気圏・電離圏結合素過程(力学・化学・放射)の解明と宇宙天気予報への応用
大気流体力学	中層大気やその上下大気との相互作用に関する研究、および惑星大気を含む地球流体に関する研究
大気流体モデリング	中層大気及び超高層大気の数値シミュレーション、例えば大気大循環および大気波動に関する理論的研究
気象学・気候力学	気象, 気候システムに関する研究, 例えば熱帯気象, モンスーン, 温帯低気圧, 台風, シビアストーム, 雲物理, 異常気象, 大気海洋相互作用, 気候変動等の研究

研究グループ	教授	准教授	助教
太陽地球系物理学		渡辺 正和	
宇宙地球電磁気学	吉川 顕正	河野 英昭	
大気圏電離圏融合 宇宙天気科学	Huixin Liu		
大気流体力学		中島 健介	野口 峻佑
大気流体モデリング	三好 勉信		
気象学・気候力学	川村 隆一	望月 崇	川野 哲也

(1) 太陽地球系物理学

太陽からは可視光が放射されて地球の生命活動に大きな影響を及ぼしていることはよくご存知だと思いますが、実は可視光以外にも、太陽は電波・X線・高エネルギー粒子・磁場を放出しています。気象学が主に太陽放射に関連する現象を扱っているのに対し、太陽地球系物理学は太陽からやってくる高エネルギー粒子と磁場が地球に及ぼす影響を研究する学問分野です。その扱う対象は、地球の上層大気から惑星間空間に至る広大な領域をカバーしています。

(2) 太陽風

太陽からやってくる粒子は「太陽風」と呼ばれています。「風」というと何かさわやかなものを思い浮かべるかもしれませんが、その速度は約 400km/s、温度は約 100,000K で「風」のイメージからは程遠いものです。高温であるため、太陽風は中性の粒子ではなく、電子とイオンに完全に電離した状態にあります。この状態は「プラズマ」と呼ばれており、電気伝導をもつ流体として扱うことができます。また、太陽風は太陽から磁場を引きずり出し、地球周辺の惑星間空間には 5-10nT 程度の磁場（惑星間空間磁場）が常に存在します。この磁場は非常に弱いですが、太陽風のエネルギーを地球に伝える上で重要な役割を果たしています。

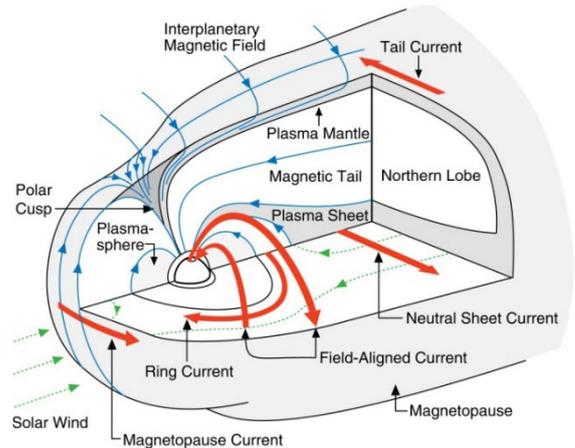


図1 磁気圏の概念図。青線は磁力線を、緑線はプラズマ対流を、赤線は電流を表す。

(3) 磁気圏

ところで、地球は磁気モーメントで約 $8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ の固有磁場をもっています。電磁気学で学んだように、真空中の磁場は導体の中に入っていくけません。言い換えれば、磁場は導体を跳ね返します。したがって太陽風が地球に吹き付けると、地球の周辺に太陽風が入っていくけない「空洞」ができます。これが「磁気圏」です。いま、「空洞」と書きましたが、実は地球磁場による太陽風の遮蔽は完全ではなく、観測によると太陽風起源のプラズマが磁気圏にたくさん侵入してきています。このように太陽風と磁気圏は相互作用をされていて、この相互作用を解明するのが太陽地球系物理学の大きな研究テーマのひとつです。磁気圏は太陽風と同じくプラズマの世界です。

(4) 電離圏

一方、地球は比較的濃い中性の大気をもっています。太陽からの紫外線が当たると、中性大気の一部は電子とイオンに電離します。これにより、大気の上層部に「電離圏」が形成されます。ここで注意しておきたいのは、電離圏といっても、電離しているのは大気全体の高々ほんの数パーセントであることです。電離圏においては、プラズマと中性大気の力学だけでなく、中性大気とプラズマの相互作用・化学反応までも考慮しなければならないので、その正確な扱いは格段に難しくなります。

(5) 多圏複合系の物理

太陽地球系物理学では、太陽風・磁気圏・電離圏をひとつの複合系 (compound system) として扱います。太陽風・磁気圏のプラズマが高温で圧縮性の電磁流体であるのに対し、電離圏プラズマは低温で非圧縮性の電磁流体です。このように性質の異なる複数の領域を磁力線が貫いています。その結果何が起こるかという、各領域は独立に振舞うことができず、お互いに情報をやりとりしながら全体として自己無撞着になるような方向に系が落ち着こうとします。このとき各領域間で情報を伝達するのが磁力線に沿って流れる「沿磁力線電流」です。沿磁力線電流がどのように生成され、どのように閉じているかを調べることは、太陽地球系物理学における大きな研究テーマのひとつです。

もし、自己無撞着性がある時突然崩れたら…。これが極端な形で現れる現象が磁気圏サブストームです。サブストームはオーロラの爆発的発達を伴い、これまで多くの研究者が興味を持って取り組んできました。しかしその物理機構は未解明で、太陽地球系物理学における最重要課題のひとつです。

(6) 九州大学における研究

九州大学では、グローバル数値シミュレーションと観測データ解析を組み合わせ、磁気圏・電離圏のプラズマ対流、沿磁力線電流、サブストームなどを研究しています。太陽風・磁気圏・電離圏の複合系が織り成す現象は複雑でかつ広大な領域に亘るため、断片的な観測データの解析・解釈だけでは限界があります。近年のコンピュータ能力の著しい向上は数値シミュレーションという新しい研究手法を可能にしました。一例を示します。図2は惑星間空間磁場が真北向きで北半球が真夏の時の磁気圏をシミュレーションしたものです。赤線は磁場トポロジーを決定する境界面 (セパトリックス) を、白線はプラズマ対流を表します。プラズマがセパトリックスを横切って流れているのが見られます。実はこれは磁力線の再結合 (リコネクション) が起こっていることを示しています。そしてその結果駆動される電離圏対流が、正に観測されていることがわかりました。これは観測データを眺めるだけでは中々思いつかないことです。一方、シミュレーションも万能ではなく、結果がもっともらしいかどうかは観測事実と照合しないといけません。また観測事実はこのようなシミュレーションを行う動機づけになっています。地球科学ではまず現象ありきで、どんな理論も現象に制約されます。現象論とシミュレーションを組み合わせた総合的な手法で現象の背後にある本質的な物理過程を抽出することが我々の目標です。

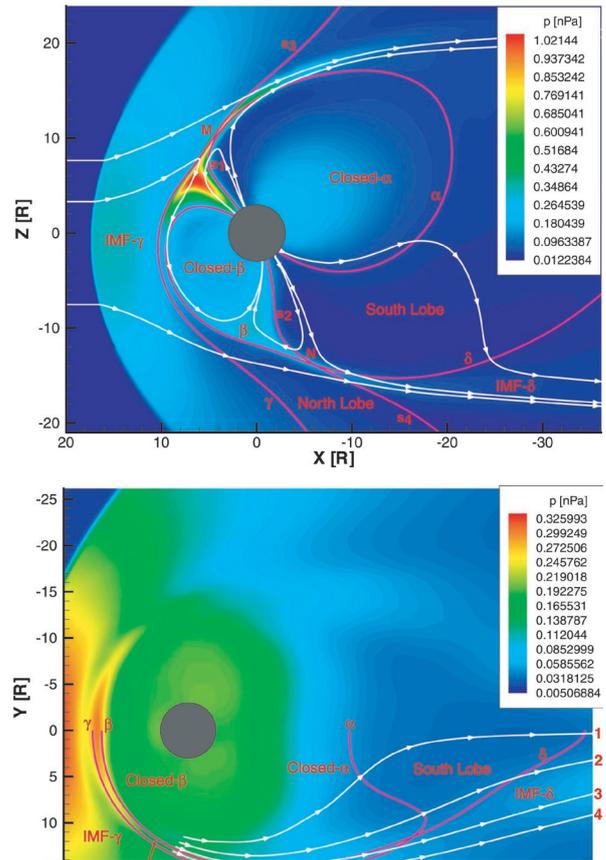


図2 惑星間空間磁場が真北向きで北半球が真夏の時の磁気圏構造。左が太陽方向。上図は真昼と真夜中を通る子午面、下図は赤道面。赤線はセパトリックスを、白線はプラズマ対流を表す。赤道面でのセパトリックスは $Y=0$ に対して対称なので $Y<0$ のみ示してある。背景はプラズマ圧を色で表してある。

宇宙地球電磁気学 電磁気学で観る太陽地球系 -宇宙天気から地震まで-

スタッフ 教授 吉川 顕正
准教授 河野 英昭

今日、人類の宇宙空間利用は着実に進められてきており、私たちの生活に身近なものとなりつつあります。例えば、地球近傍の宇宙空間(宙空領域)における様々な人工衛星の運用は通信・情報化社会における基盤的な役割を担っています。同時にこの領域は太陽活動によって磁気嵐が発生し、高エネルギー粒子による放射線帯が形成される領域であり、宇宙機や生体にとって非常に過酷な環境です。このような宙空環境の変化(宇宙天気)を的確に把握、さらには予測・予報することは多くの研究者にとっての関心事であり、また社会からも大いに期待されていることです。

宇宙天気現象の多くは惑星規模の空間スケールで生じる電磁気学的現象です。それらを正しく捉え、理解すべく当研究分野では“観測・解析・理論”に基づく総合的な視点から研究を行っています。具体的には以下のような現象について研究を行っています。

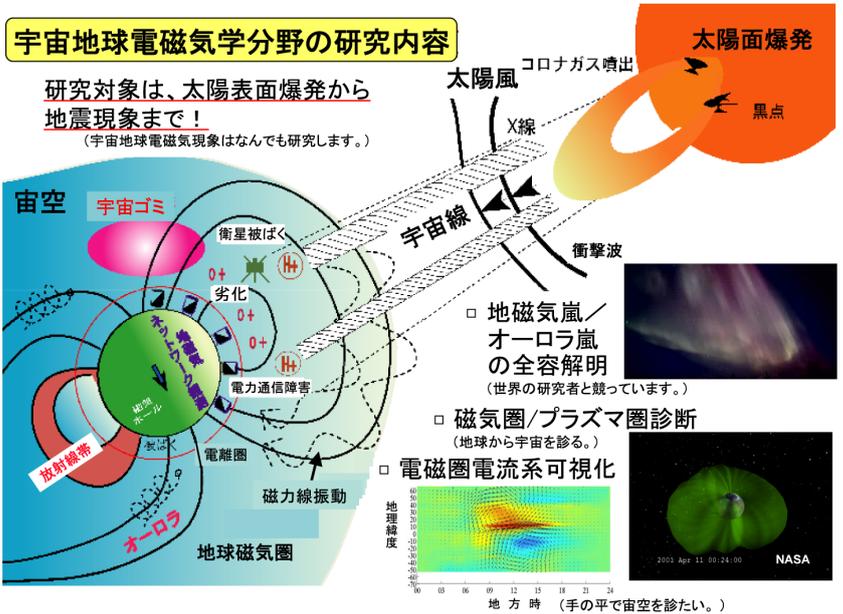


図1. 太陽地球システムにおける宇宙地球電磁気学分野

(1) オーロラ嵐

オーロラ嵐とは夜側の高緯度帯においてオーロラが急激に輝き出す現象です。この現象は、夜側地球磁気圏尾部に蓄えられた太陽風起源のプラズマ粒子が、何らかの理由で突然解放され、極域の高層大気における酸素・窒素の原子・分子と衝突することにより生じる発光です。しかしながら、何が最終的な引き金(トリガー)となってオーロラ嵐が始まるのか、その発生機構については長年の研究にも関わらずほとんどわかっていません。そのため、オーロラ嵐の発生メカニズム解明は“磁気圏物理最大の問題”とされています。私たちはオーロラ嵐開始時に汎世界的に観測される磁気波動現象(Pi2型地磁気脈動)の生成・伝搬特性を調べ、オーロラ嵐の監視・原因解明に取り組んでいます。

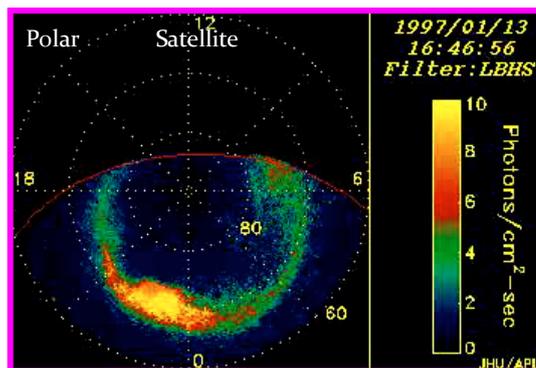


図2. 人工衛星からのオーロラ画像. 宇宙空間から地球の極域を観たところ

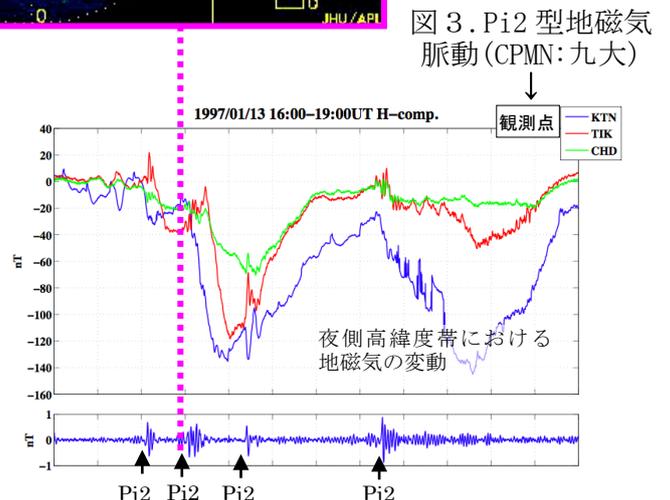


図3. Pi2型地磁気脈動(CPMN:九大)

(2) プラズマ圏診断

電磁流体力学に基づき、地球近傍の宇宙空間(プラズマ圏; 図4)におけるプラズマ密度を地上磁場(磁力計で観測)や電離圏プラズマ速度(地上レーダーで観測)から推定する研究を行っています。これら地上観測データと宇宙空間で衛星観測されたデータを組み合わせることで、より精度の高いリモート観測手法の確立を目指しています。このような研究を発展させることは宇宙空間におけるプラズマ環境の監視やその変動を支配している物理解明に大変役立ちます。

(3) 大規模電離圏電流系

地上約100kmの高層大気(電離圏)では、中性大気の循環運動とプラズマの運動が相互に作用し、大規模な電流系(Sq電流系と赤道ジェット電流)が生成されます(図5)。従って電離圏電流の研究は様々な宇宙天気現象と密接に関係しているばかりではなく、高層大気運動の問題としても重要です。最近の研究では、下層大気(対流圏や成層圏)で生じた大気波動が高層大気(電離圏)におけるプラズマの分布を決める重要な要因であるということがいわれています。研究室では大規模電離圏電流系に見られる上層からの影響(太陽からの光エネルギー及び電磁エネルギー侵入過程)と下層からの影響を正しく評価し、高層大気の長期的気候変動を調べる研究を行っています。

(4) 地震電磁気学現象

これは宇宙天気研究以外で本研究室が取り組んでいる研究課題の一つです。近年、地震に伴った前兆現象として、電磁気学的現象が数多く報告されています。たとえば、地磁気・地電位差変動、震源域上空の電離圏変動による電波の伝播異常などの現象が確認されています。そのなかでもULF波動の異常変動については、比較的信頼のある結果が得られており“地震予知”の観点から大変注目を集めています。地上で観測されるULF波動は太陽風を起源とし、その伝播過程において磁気圏・電離圏・地圏の影響を受けます。そこで、地震前後で観測されたULF波動を地球内部起源の成分と太陽起源の成分とに正しく分離し、それが実際に地震と関係しているかどうかを調べる解析研究を行っています。

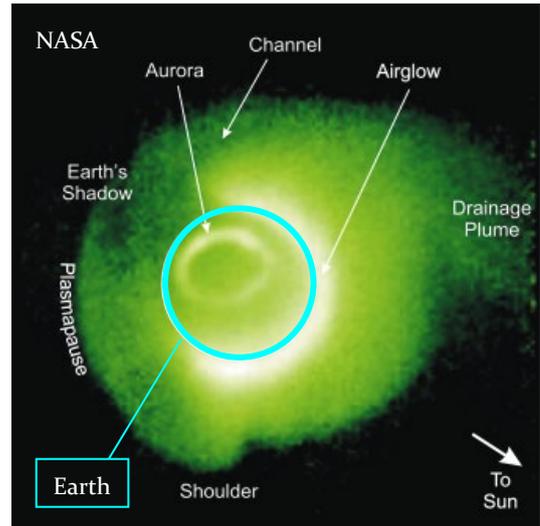


図4. Image衛星によるプラズマ圏の撮像。

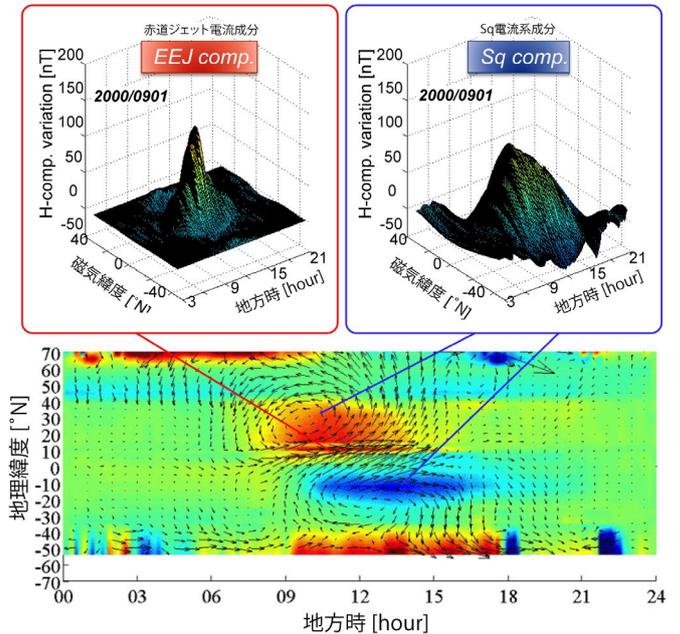


図5. 大規模電離圏電流系の可視化

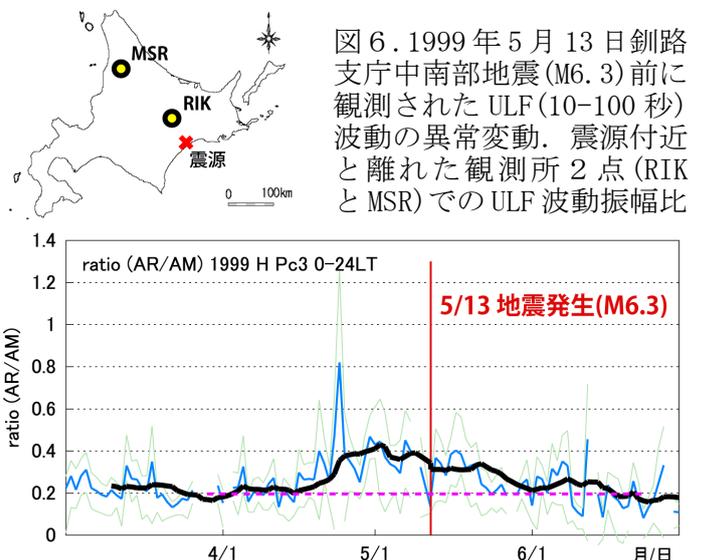


図6. 1999年5月13日釧路支庁中南部地震(M6.3)前に観測されたULF(10-100秒)波動の異常変動. 震源付近と離れた観測所2点(RIKとMSR)でのULF波動振幅比

大気圏電離圏融合宇宙天気科学

—地球・惑星での大気・プラズマ結合素過程の解明と宇宙天気予報を目指す—

スタッフ 教授 Liu Huixin

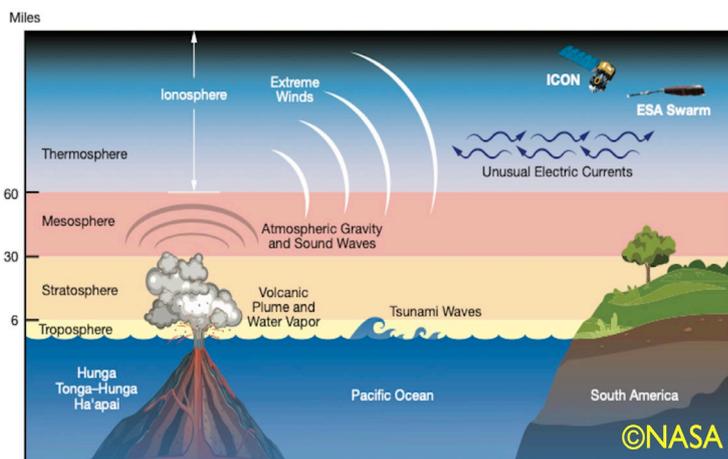
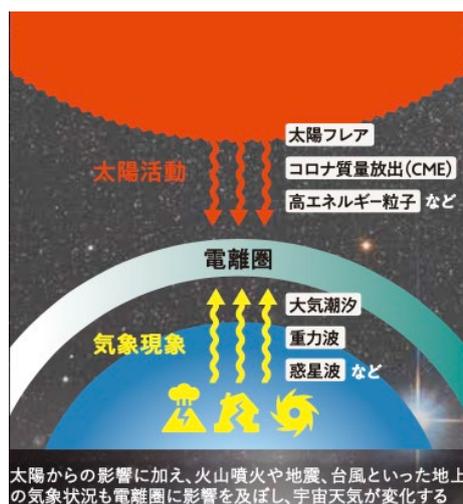
雲の遥か上まで広がる宇宙空間に、電離圏 (Ionosphere) という電気伝導性のある気体が存在し、その密度や温度などが常に変化しています。この変化が「宇宙天気」です。晴曇霧雨といった地上の天気と同様、宇宙天気も我々の生活に深く関連し、GPS、無線通信、送電網といった社会インフラに地球規模で影響を及ぼします。それゆえ、世界各国が連携し宇宙天気予報を精力的に発展させています。本研究室では NASA や米国立大気研究センターNCAR、ドイツ大気物理研究所や航空研究機構 (DLR)、日本の宇宙天気予報センターなどと活発な国際共同研究を交えて、宇宙天気についての基礎研究と応用を3つの柱のもと行っています：①地球における大気圏・電離圏結合素過程の解明；②火星などの惑星における宇宙天気現象と物理過程の解明、比較惑星研究の推進；③電離圏宇宙天気予報への応用。以下これらについて簡単にご説明します。

① 地球における大気圏・電離圏結合についての研究

上空 70~1000km を占める電離圏は上からは太陽活動、下からは大気圏の様々な気象現象 (台風や津波、火山噴火や地震) による影響を受け、日々変動しています (左図)。この気象現象と宇宙天気の繋がりは近年大きく注目されている新研究領域です。本研究室はこの繋がり (=大気圏・電離圏結合) の素過程の解明を目指し、様々な宇宙天気現象を研究しています。

その一例が、2022年1月15日のトンガ火山噴火時の大気圏電離圏結合現象です (下図)。噴火によって励起されたラム波や重力波、音波などの大気波動が上方の電離圏まで伝播し、全球電離圏密度や構造を大きく擾乱させたことが多数の科学衛星により観測されました。

大気圏・電離圏結合は火山噴火のような激しい現象のみならず、様々な時空間スケールで発生していることが最近の研究で明らかになってきました。例えば、熱帯域の対流活動が電離圏・熱圏中の重力波分布を左右することは本研究室が世界で初めて解明しました。また、対流圏温暖化やエルニーニョ気候変動などが熱圏循環や電離圏プラズマにどのような影響を与えているのか等の研究も活発に行われています。



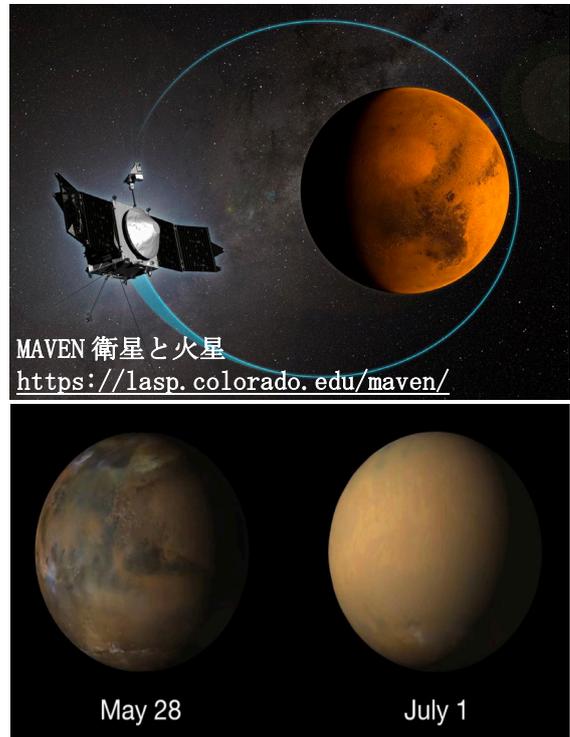
研究にあたり、本研究室は主に NASA や ESA の衛星観測と、世界最先端の大気圏・電離圏結合モデルである米国大気研究センター (NCAR) の WACCM-X の数値シミュレーションを使用して国際共同研究を推進しています。

②惑星における大気圏・電離圏結合についての研究

地球と同様、太陽系の他の惑星においても大気圏・電離圏結合に関する研究が行われています。本研究室では特に火星において、下層大気（対流圏～中間圏、高度～100km）が超高層大気（高度 100～230km）に及ぼす影響を NASA の MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) 衛星を用いて研究しています。

火星大気は主に二酸化炭素で構成され（モル分率 95.32%）、地球に比べ大気が非常に薄い（大気圧は地球の約 100 分の 1）という性質上、超高層大気は下層大気や宇宙空間から大いに影響を受けます。また、地球や他の惑星にはあるダイポール磁場がなく、南半球に過去の磁場の名残として非常に弱い地殻残存磁場が残っている程度なので、太陽風など宇宙空間からの影響を受けやすい状態です。

現在は火星の特筆すべき現象である下層大気で発生するダストストーム（砂嵐）が超高層大気に与える影響に着目していますが、今後は地球と同様、宇宙天気の影響も研究することで、包括的な理解を目指しています。

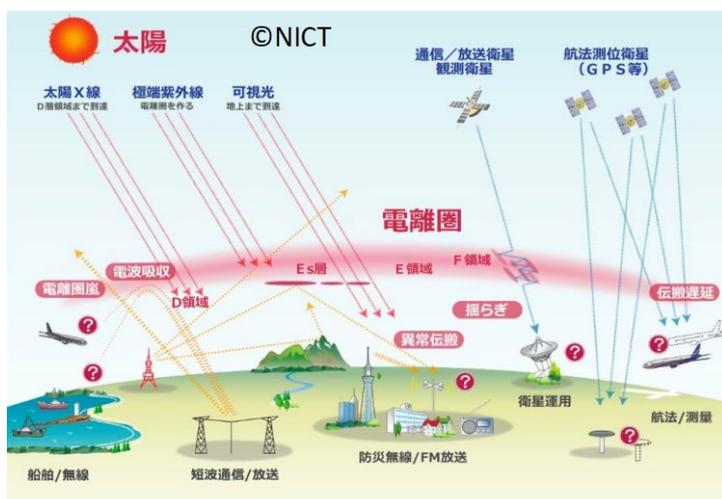


MAVEN 衛星と火星
<https://lasp.colorado.edu/maven/>

2018年7月に火星で発生した惑星規模大規模ダストストーム前後の衛星写真
<https://svs.gsfc.nasa.gov/30983/>

③宇宙天気予報への応用

電離圏擾乱は通信衛星、長距離無線通信やGPS精密測位、衛星軌道制御などに影響を及ぼすため（左図）、宇宙天気予報が社会から強く求められています。本研究室では、



3つの重要な宇宙天気予報要素について研究を行っています。(1) 船や航空などの無線通信に使われているHF通信に大いに影響する電離圏突発E層(Es)の構造特徴と発生機構;(2) 衛星精密測位に影響する電離圏のプラズマバブル(EPB)の発生特徴と発生機構;(3) 衛星軌道制御に直接関わる熱圏密度の急上昇。(1)と(2)は日本宇宙天気

予報センターと名古屋大学と共同研究を行っています。

本研究室に興味のある方はどうぞお気軽にお尋ねください huixin@ucar.edu。また本研究室の様子は九大広報にも紹介されています、ぜひ参考にしてください。

https://www.kyushu-u.ac.jp/f/55335/kyudaikoho128_web_2.pdf (15-17 page)

本研究室現在のメンバーは以下のようになっています。

Liu Huixin(教授) Qiu Lihui (特プロ助教) 木暮優(JSPS 特別研究員)

Postdocs: Dr. Tingting Yu, Dr. Han Ma

Students: F. N. Rifqi (D1), Gloria Tan Jun(D1), H. Narimoto(M2),

S. Miyake (M2), T. Maeda(M1), N. Nagata(M1)

中層大気・汎惑星流体の力学

地球の大気は、気温の高度方向の変化傾向により、地表から高度 10km くらいまでの対流圏、そこから高度 50km くらいまでの成層圏、さらに 90km くらいまでの中間圏、さらにそれより上の熱圏という 4 つの領域に区分されます。その中で、高度約 10–100km の大気領域は、その上下の大気と異なる様々な特徴を有し、「中層大気」と呼ばれています。この領域では、水蒸気が極めて少なく、対流圏のような雨かんむりの現象はほとんど存在しません。その代わりに、オゾン層とその紫外線吸収による加熱効果、ならびに下層の大気で励起され、選択的に伝播して来た広い時間・空間スケールを持つ大気波動の存在により、固有の様々な興味深い現象が生起しており、上下の大気を繋ぐ重要な領域となっています。また、中層大気は、皆さんお馴染みの地面近くの大気と比べて地形や水蒸気凝結の影響を直接受けにくく、ある意味で理想的な流れが卓越しており、色々な理論の検証のための実験室と見なすことができます。

一方、地球の大気・海洋の流れで共通の、基礎となる力学を「地球流体力学」と呼び、回転や成層が流れに及ぼす影響についての統一的な理論がこれまでに構築されてきました。近年では、湿った大気の振る舞いも含めた、旧来の地球流体力学の枠を超えた理論も試考されています。また、地球流体力学の応用範囲は、太陽系の他の惑星、そして他の太陽系の惑星、仮想的な惑星上の流れにも広がっており、時には地球の常識を覆すような現象に出会うこともあります。

私たちの研究室では、高度 100km くらいまでの大気に関わる力学や惑星の流体力学について調べています。以下では、私たちの研究の中から、中層大気の詳細な天気予報、オゾンホールの変動、木星大気における対流・大赤斑、仮想大気の流れについて紹介します。

(1) 中層大気の詳細な天気予報

中層大気中では「成層圏突然昇温」と呼ばれる、成層圏極域の温度が数日のうちに(対流圏では考えられないほど)急激に上昇する、特異な現象が起こります。

図 1 は、ある年の冬季における北極域上空の温度変化の観測(赤線)と、その予測結果(黒細線)について示しています。1月の半ばから下旬にかけて突然昇温が発生しており、ここでは少し条件を変えた複数の予測結果が示されています。上図ではどの予測も昇温ピークを捉えられず結果もばらついていますが、下図ではほぼ全ての予測で昇温が再現されています。したがってこのタイミングから突然昇温が確実に予測可能となっていたといえます。このような予測特性の変動が、流れのどのような特徴と関係しているのか、他の領域の予測にどの程度の影響を与えるのか等を調べることは、重要な研究課題となっています。

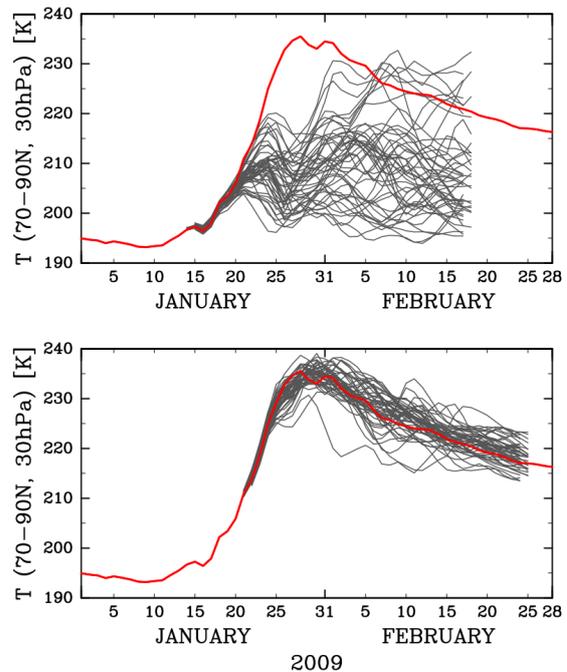


図 1. 高度約 25km 付近における北極域温度の時間変化(K)。赤線が観測、黒細線が予測。上図は 2009 年 1 月 14 日、下図は 1 月 21 日からの予測結果。

(2) オゾンホールの変動

中層大気では、力学・放射・化学が密接に関わり合っています。図2には、1980年代以降の毎春、南極大陸をすっぽり覆うように発達していたオゾンホールが、二つに分裂して一時的に縮小した時の様子を示しています。このような大規模な流れの変化によって、物質循環ひいては大気組成がどの程度変化するのか？逆に大気組成・放射強制力の変化はどれくらい流れを変えるのか？地球システム構成要素間の相互作用の強さを定量的に解き明かしていくことで、地球環境の成り立ちを、より詳細に把握することができます。

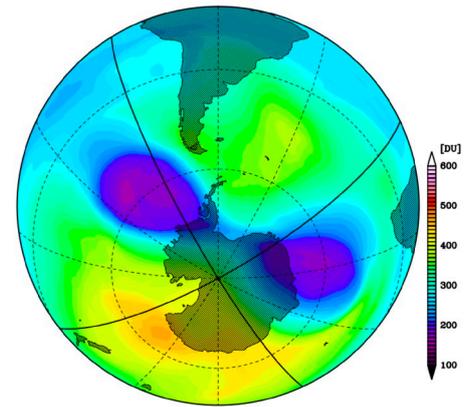


図2. 南極オゾンホールの分裂の様子。数値モデルによるシミュレーションと衛星などの観測を（データ同化という処理によって）組み合わせて得た、2002年9月24日のオゾン全量の分布図。

(3) 木星大気における対流・大赤斑

地球や惑星のスケールの流れは、日常の流れとはひと味違います。流れが上下に大きな広がりを持ち、物質が大きな圧力・温度の変化を経験する結果、「雲」ができますが、その様相は惑星によって様々です。図3に示した木星の雲は、地球のほぼ水（氷）からなる雲とは組成から異なり、アンモニアや硫化水素の凝結と化学反応によって興味深い鉛直層構造を形成しています。また、木星の眼のような特徴的な模様を作っている大赤斑は、巨大な高気圧性の渦ですが、地球をよりも巨大なこの構造が生成・維持される機構など、素朴な経験知だけでは思い至らないかもしれません。地球流体力学は、地球の大気と海の共通した仕組みを考えることから始まり、その後、このような太陽系の他の惑星の構造解明にも踏み出しています。実際、図4のように、大赤斑は地球の海の方方程式である程度まで再現できることがわかっています。

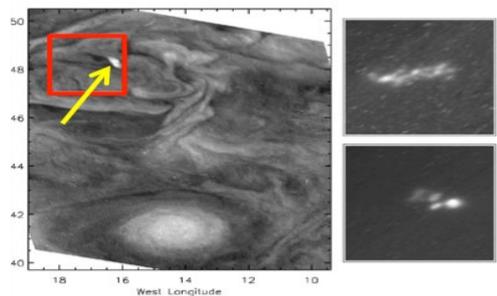


図3. ガリレオ探査機が撮影した木星の積乱雲（左図の黄色の矢印）。赤四角の部分に夜に撮影すると稲光が見える（右図）。

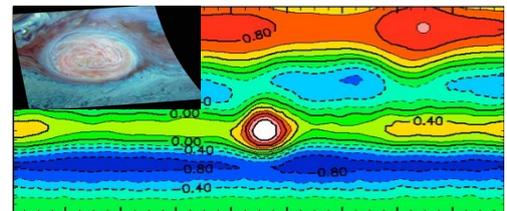


図4. 地球の海の方方程式に基づいて作成した数値モデルの中に生まれた巨大な渦。木星の大赤斑（左上）と似ている。

(4) 仮想大気の流れ、そして汎惑星流体力学へ

地球・惑星が丸く、自転していることは、大気や海洋の惑星スケールでの運動を支配して、地球・惑星の気象や気候に様々な影響を与えます。図5には、陸地のない、理想的な惑星上で生じる大気の流れを示しました。このような流れの顕現理由の探究を通じ、普遍的・根本的な理解に至れるかもしれません。今や多様な惑星が他の星の周囲に見つかっています。これら系外惑星の大気や海の振る舞いも一つの枠組みの中で捉えることができるような「汎惑星流体力学」を作り上げることは、大きな夢の一つです。

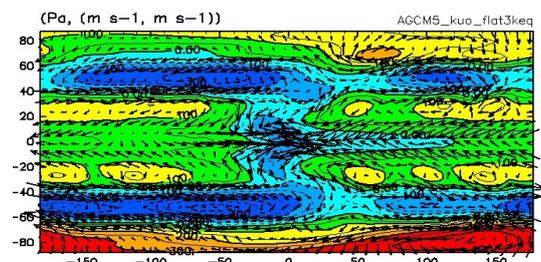


図5. 全面が海で覆われた“水惑星”のシミュレーション。中央の雲活動の影響は惑星自転のため赤道沿いに東に広がる。

私たちの研究室では、高度およそ 500km くらいまでの大気の大規模な循環に関わる力学について調べています。高度およそ 500 km までの大気は、気温の高度方向の変化傾向により、地表から高度 10 km くらいまでの対流圏、そこから高度 50 km くらいまでの成層圏、さらに高度 90 km くらいまでの中間圏、さらにそれより上の熱圏という 4 つの大気領域に分かれています。その中で、高度およそ 10 km 以上の大気領域では、水蒸気が極めて少なく、対流圏のような降雨・降雪を伴う現象はほとんど存在しません。その代わりに、気象現象の影響により励起された大気波動が鉛直上方に伝播することで、興味深い現象が数多く生じています。さらに、熱圏では大気成分の一部が電離した電離圏が存在し、電離していない中性大気成分との相互作用や様々な時間スケールで変動する太陽活動の影響により激しく変動する現象が数多く存在します。以下では、私たちの研究の中から、成層圏突然昇温現象と中間圏・熱圏への影響、中間圏・熱圏の流れのシミュレーション、宇宙天気との関連について説明します。

(1) 成層圏突然昇温と中間圏熱圏への影響

冬季成層圏では「成層圏突然昇温」と呼ばれる、北極域の温度が数日のうちに急激に上昇する現象が起こります(図 1 上図)。成層圏突然昇温は、対流圏で励起された地球規模の大気波動が原因であることが明らかとなっていますが、成層圏突然昇温は、成層圏北極域のみならず、南極域やはるか上空の熱圏での温度や循環にも影響を及ぼすことが明らかになってきています。図 1 下図は、数値シミュレーションにより明らかとなった、成層圏突然昇温発生時の中間圏南極域での温度変化を示しています。成層圏突然昇温が発生すると同時に、中間圏南極域の温度が低下しています。さらに、熱圏でも温度低下が発生することが明らかとなっています。成層圏北極域の現象がどのようにして反対半球やはるか上空の熱圏での温度や循環に影響しているのかについて、全大気大循環モデルと呼ばれる数値モデルを用いて研究しています。成層圏突然昇温は 1 例ですが、成層圏での大気循環の変化は他の大気領域での大気循環に影響を及ぼすことが明らかになりつつあります。

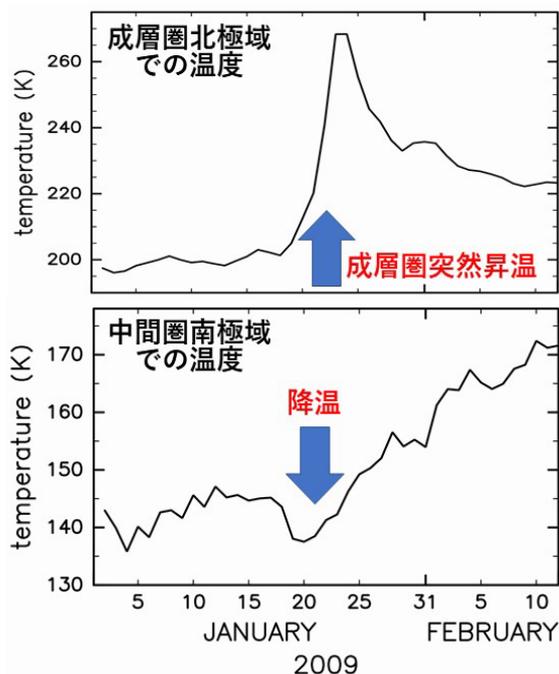


図 1 (上図) 成層圏高度 30 km の北極域での 2009 年 1 月 1 日から 2 月 12 日までの温度変化。1 月下旬に急激な温度上昇 (数日で約 60K 以上の温度上昇) が発生している。(下図) 同じ時期における中間圏高度 80 km の南極域での温度変化。成層圏突然昇温発生時には、約 10K の温度低下が発生している。

(2) 中間圏・熱圏のシミュレーション

私たちの研究室では、独自に開発してきた地球大気全ての領域を含む全大気大循環モデルを用いて、中間圏や熱圏領域特有の流れの特徴を明らかにするため、さまざまな条件の下での数値シミュレーションを行っています。

図2は、そのようなシミュレーション結果に基づく、高度40kmと100kmでの温度(カラーの陰影)、水平風(ベクトル)分布(9月の例)を描いたものです。40kmでは、中緯度域で西風が卓越し、東西方向の流れが卓越しています。100kmでは、太陽放射に日変化に起因する潮汐波や、よりスケールの小さい重力波に伴う循環が見え、40km(成層圏)とは大きく異なる循環形態をしています。このように高度域によって、循環は大きく異なり、同じ地球大気でも高度領域により大きく異なる循環のメカニズムを理解することが重要です。

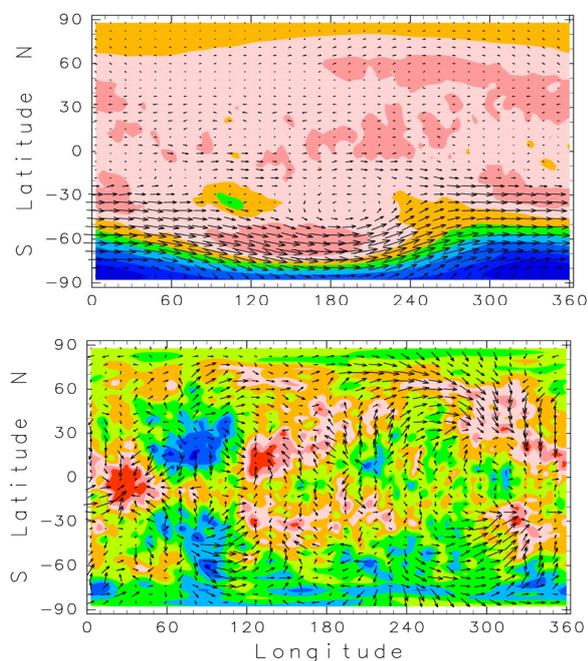


図1 私たちの研究室で開発した大気大循環モデルを用いたシミュレーション結果に基づく、高度40km(上)、100km(下)での温度(カラーの陰影)、水平風(ベクトル)分布図。暖色系が高温域、寒色系が低温域。縦軸が緯度、横軸が経度。9月の計算例。

(3) 宇宙天気：太陽活動や磁気嵐が引き起こす熱圏変動

熱圏領域では、中性大気と電離大気(電離圏)が共存するため、通信・放送・測位、衛星運用、航空運用と密接な関係があります。特に、熱圏での大気密度は、低軌道衛星にとって大気抵抗として働くので、低軌道衛星の軌道変化・運用にとって重要です。例えば、2022年2月3日に発生した磁気嵐(オーロラ活動に伴う磁気圏から熱圏へエネルギーの流れ込み)による大気密度の急上昇により、大気抵抗が増加しStarlink衛星39機が落下したことが知られています。図3に、私たちの研究室で実施された数値シミュレーションにより明らかとなった、磁気嵐時の大気密度変化率を示します。Starlink衛星の軌道高度約200kmでは、2日間で大気密度が最大で1.5倍(150%)になったことがわかります。さらに上空の高度約400kmでは、大気密度が2~2.5倍になることが示されています。このように、熱圏は太陽活動やオーロラ活動の影響を強く受けて急激に変化します。私たちの研究室では、熱圏大気の変動の様子を数値シミュレーションによる研究を行っており、衛星運用などの宇宙天気予報の改善・高精度化に取り組んでいます。

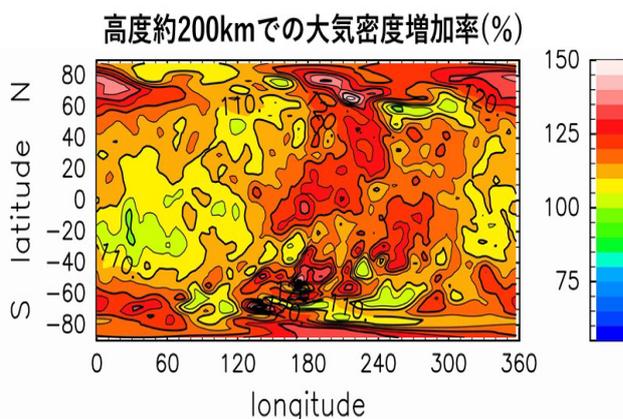


図3 2022年2月3日に発生した磁気嵐に伴う熱圏大気密度の増加率(%)の経度-緯度分布。2月1日の大気密度との差を示す。

気象学・気候力学 対流スケールから全球スケールまでの気象現象を探求する

スタッフ	教授	川村 隆一
	准教授	望月 崇
	助教	川野 哲也

対流圏で起こる気象現象は、私たちの日常生活と深いかわりがあるので、対流圏の気象現象の研究は気象学者の興味の対象として重要であるばかりでなく、気象災害の減災・防災や異常気象の予測に対して社会からの強い要請があります。また気候の将来予測においては、大気循環と海洋循環との相互作用などの気候システムの理解が益々重要となっています。

本研究分野では、対流圏の気象現象を幅広くカバーし、また異常気象や気候変動の研究もしています。研究対象とする現象を水平スケールという観点から見ると、地球規模の大気大循環や惑星波のスケール(10,000km)から、高・低気圧波動や台風、梅雨前線のスケール(2,000km~200km)、竜巻や個々の対流雲のスケール(200~20km)までをカバーしています。また、研究対象を領域という観点から見れば、赤道域から中緯度、極域までを含んでいます。以下では、もう少し具体的に水平スケールごとに研究内容を紹介します。

(1) モンスーン循環と異常気象

モンスーン循環とは季節によって風系が反転する循環のことです。このモンスーン循環は対流圏の大気大循環を特徴づける一大システムであると同時に、アジアモンスーンやオーストラリアモンスーンなど各地域で特徴的な循環システムが存在しています。人口が集中しているモンスーン地域は大規模気象災害に脆弱であり、モンスーン変動は洪水や旱魃による広域的な人的被害・農作物被害などをもたらすため、実用的な災害予測が社会から要請されています。地球観測衛星によるリモートセンシング、数値モデルやデータ同化手法の急速な発展、そして様々な観測プロジェクトにより、モンスーンシステムの多面的な動態が明らかになりつつありますが、モンスーンシステムの揺らぎをもたらす、大気陸面相互作用並びに大気海洋相互作用が複雑に絡み合った現象を紐解いていく試みが益々必要とされています。研究室では、モンスーン変動と関連する異常気象のメカニズムの解明を目指しています。

(2) 全球スケールの気候変動と予測可能性

季節から数年、十年といった近未来の気候変動に対する高精度予測は、防災・減災といった社会経済的な政策決定において重要な基盤情報になります。このような情報の信頼度を高めるために、日々の天候の移り変わりを予測する天気予報と似たような原理で観測データを気候モデルに融合する(初期値化)技術を活用して、全球スケールでの気

Reg MOI vs Z500 (DJF)

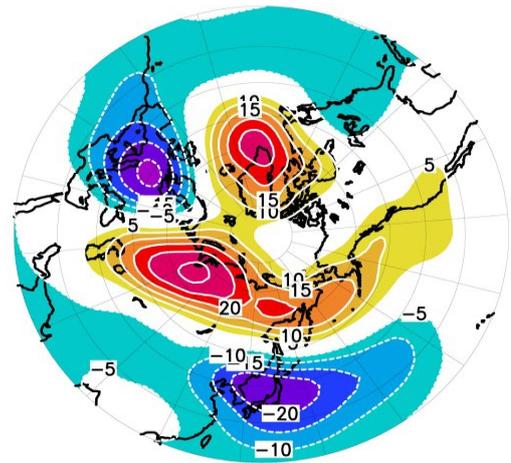


図1 日本に寒冬をもたらす北半球規模の大気循環変動。陰影は500hPa高度偏差。ユーラシア北部を横切る寒帯前線ジェットのスネリングが生じています。

候の揺らぎを何年も先まで予測する研究に取り組んでいます。

こうした取り組みは、近年のスーパーコンピュータの高性能化や気候モデルの高度化、観測データ網の発達によって可能になってきました。エルニーニョ現象や太平洋十年規模振動、大西洋数十年規模振動といった全球スケールの気候に揺らぎを与える様々な変動現象のメカニズムを解明することに加えて、実際の予測情報における不確実性の評価やその要因分析に取り組み、そうした変動現象に対する予測可能性の理解を目指しています。

(3) 台風や爆弾低気圧の擾乱活動と大規模循環との相互作用

台風と急速に発達する温帯低気圧（爆弾低気圧）は双璧をなす総観規模擾乱です。両者の擾乱はともに直接的な気象・海象災害をもたらすだけではなく、対流圏上層に強い発散場を形成するために、定常波（ロスビー波）の励起を通して遠隔影響をもたらすポテンシャルをもっています。具体例として、台風の遠隔影響で日本付近の梅雨・秋雨前線が活発化することが報告されています。また、ロスビー波束の伝播によって異常気象の原因となるブロッキング現象や、成層圏突然昇温発生の引き金となる可能性も考えられます。再解析データ等の解析や、大気大循環モデル・領域気象モデルを用いた数値実験に基づき明らかにし、短期天候予測の改善ならびに減災・防災に貢献していきます。

(4) 梅雨前線付近のメソスケール気象擾乱

九州地方はその地理的および気象学的環境条件から、梅雨期に集中豪雨が数多く発生します。メソスケール現象というのは水平スケールが2,000kmから2kmまでの気象現象を含んでいて、さらに3つのサブグループ(メソ α 、メソ β 、メソ γ)に分類されます。梅雨前線付近の気象擾乱で重要なのは、メソ β スケール(水平スケール200km~20km)の擾乱であり、本分野ではそれらの発生要因の研究を行っています。過去の豪雨事例のなかから、1993年8月に発生した鹿児島豪雨、1997年7月の出水豪雨、1999年6月の福岡豪雨、2003年7月の福岡豪雨、水俣豪雨などを研究対象と

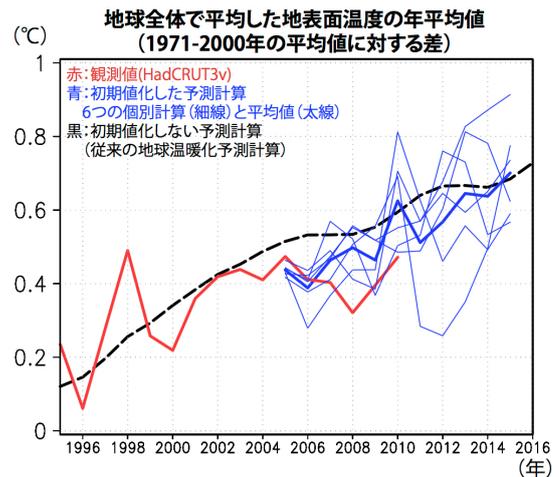


図2 計算開始時刻(例:2005年1月1日)にわずかな差を持つ気候状態を6つ用意して10年先まで予測計算しました。計算開始時刻のわずかな差が、数年後には予測計算結果に思わぬ差(不確実性)をもたらします。



図3 メガストーム情報データベースを構築し公開しています。
<http://fujin.geo.kyushu-u.ac.jp/>

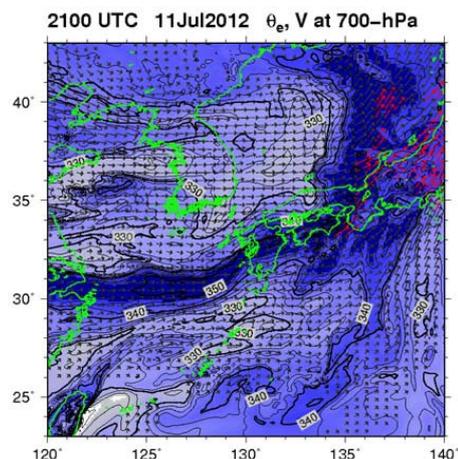


図4 九州北部豪雨発生時の700hPa面の相当温位空間分布。東シナ海上に(いわゆる)湿舌が出現しています。

して取り上げました。これらの研究を通じて地形によるメソβ線状収束帯の形成、梅雨前線付近の二次的なメソβスケール収束帯の形成、メソ対流系と呼ばれる対流雲の集団の形成が重要であることが分かってきました。

(5) 竜巻の研究

竜巻といえば北米大陸の中西部で発生する巨大竜巻(トルネード)を連想しますが、規模は小さいものの、日本でも台風接近時や寒冷前線通過時に竜巻が数多く発生しています。近年、特に強い竜巻の発生が目立ち、2006年9月には延岡で1名、同年11月には北海道佐呂間町で9名の犠牲者を出しました。本研究分野では2004年6月27日、佐賀市で発生した竜巻を対象として、数値モデルによる再現実験と感度実験を行い、それらの結果の解析から、竜巻の発生にとって地表付近の境界(佐賀竜巻の場合には梅雨前線)が非常に重要であることを示しました。そのような境界(前線, ドライラインなど)の重要性は北米大陸のトルネードについても指摘されています。その意味で本研究は1事例解析にとどまらず、竜巻発生の普遍的原因の解明にも大きな寄与をしています。

(6) 冬季北陸の雪雲の微物理的・電氣的構造の研究

冬季に西高東低の冬型気圧配置になるとシベリアから寒気が吹き出します。それと同時に、日本海上では急激な気団変質が進行し、その結果発生・発達した雪雲は日本海沿岸部に降雪をもたらします。この降雪機構を知るためには、雪雲内の微物理構造、すなわち雪や霰の空間分布を測定する必要があります。本研究分野では「ビデオゾンデ」という特殊な観測機器を雪雲内に飛ばし、雪雲内の微物理構造を直接観測する研究を行っています。これまでの観測から、降雪雲のタイプによって雪や霰の空間分布が異なっているという興味深い結果が得られています。また、冬季北陸の雪雲は豪雪をもたらすだけでなく、「一発雷」という単発だけれども電流値の非常に大きな雷を発生させることでも有名です。雲内の電荷の主な担い手は雪・霰であることが知られていますが、ビデオゾンデは粒子の種類・形状・サイズおよび電荷量を同時に測定

することができるので、ビデオゾンデ観測によって冬季北陸の雪雲の降雪機構や雷活動の解明を目指しています。



図5 ビデオゾンデを飛ばす直前の様子です。



図6 ビデオゾンデで観測された雪雲内雪片(左)と霰(右)。

固体地球惑星科学 地球惑星生物学

専門分野 専門分野

- ・地球内部ダイナミクス
- ・岩石循環科学
- ・火山科学
- ・地球深部物理学
- ・地球進化史
- ・古環境学
- ・観測地震・火山学
- ・地震火山減災科学

- ・地球惑星生物学



古環境
地質調査

火山・地震



地球・惑星内部



古生物
化石



固体地球惑星科学 専門分野・地震火山長期予測・防災 専門分野・ 地球惑星博物学 専門分野

各研究グループの研究内容の概略

研究グループ	研究内容
地球内部ダイナミクス	地球内部構造と地球内部ダイナミクスの研究
岩石循環科学	火山噴火のダイナミクス, 岩石パターンの成因, マグマの発泡・結晶化・流動についての研究。変成岩を用いた地殻深部, 上部マントルでの物理化学過程の研究。化学組成とそれに関連する理論に基づく岩石成因の解明
火山科学	野外地質調査、物質科学分析、室内実験、数値計算に基づくマグマ活動と噴火メカニズムの研究
地球深部物理学	地震波動や地磁気の解析による地球深部構造と変動の研究
地球進化史	堆積岩の形成過程及び島弧・変動帯の堆積作用とテクトニクスに関する地球史的研究
古環境学	古海洋環境変動と海洋沈降粒子の研究
観測地震・火山学 地震火山減災科学	地震及び火山現象の観測に基づく地震発生・火山噴火過程の研究 地震・火山噴火災害の発災ポテンシャルを評価し, 災害の軽減化(減災)に役立てる研究
地球惑星博物学	化石生物の古生態と形態進化の研究

各研究グループのスタッフ

研究グループ	教授	准教授	助教
地球内部ダイナミクス		吉田 茂生	
岩石循環科学	寅丸 敦志	池田 剛	宮本 知治
火山科学	下司 信夫		大橋 正俊
地球深部物理学	金嶋 聰	高橋 太	
地球進化史	尾上 哲治	清川 昌一	佐藤 峰南
古環境学	岡崎 裕典		
観測地震・火山学 地震火山減災科学	※松本 聡 ※松島 健	※相澤 広記 ※江本賢太郎	
地球惑星博物学	@伊藤 泰弘		

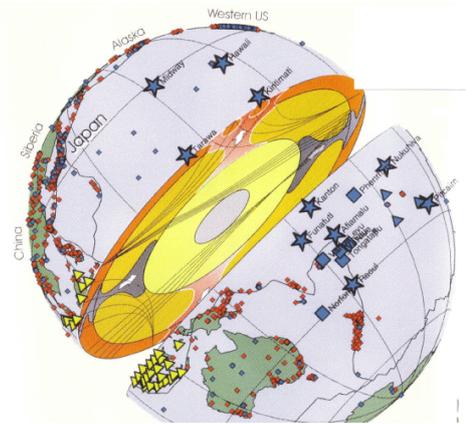
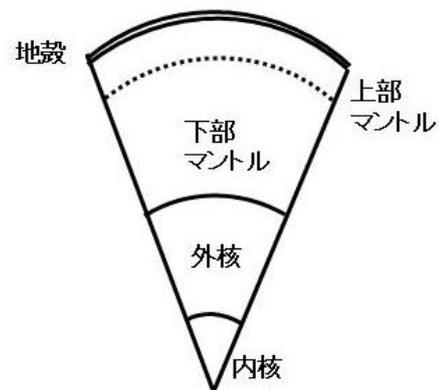
地球の内部は45億年の間ダイナミックに運動し変遷してきました。また地球と月は誕生以来お互いに相互作用をしながら進化しました。そのような地球内部と地球・月システムの状態と変遷を理解するために、本研究分野では以下の様な研究を行っています。

(1) 地球の深部はどうなっているのか

アリストテレス自然学においては、地球は不動の世界中心に位置する不毛な土の塊であって、人間の好奇心の対象ではありませんでした。宇宙あるいは星辰の世界に対して人間が深い関心を抱いた事と対照的だった訳です。17世紀に近代的な自然哲学が成立すると、人間にとって地球は、自らの知的活動を通じてその正体を理解すべき驚異に満ちた自然へと変貌しました。そして、19世紀の地質学成立により、地球表層付近に関する人間の理解は著しく進展しましたが、地球の深部は相変わらず神秘のベールに包まれていたのです。地球深部の解明に画期的な進歩をもたらしたのは、20世紀開始と共に始まった地震学をはじめとする地球物理的研究です。地球は地殻、マントル、外核、内核から成り立つ事は良く知られています(図1)。

21世紀の現在、我々は地球深部について、驚くほど詳しく知っています。地表に張り巡らされた地震観測点網により、我々は医者が聴診器によって体内の音を聞くように、地中の音(地震波)に耳をすませます(図2)。そして過去2億

年に地表から地球深部に沈み込む海洋プレートはいうに及ばず、最近では、数十億年前に海底を覆っていた地殻と考えられる地球深部の岩塊さえも見つける事ができるようになっています。また、地球の岩石に含まれる諸鉱物は圧力と温度の増加に伴い結晶構造を変化させると推測されていますが、この構造変化が具体的にどの様に起きているのかも徐々に明らかになってきました。人間が直接見ることのできない地球の深部は未だに不明な点が沢山残っていることは言うまでもありませんが、地球深部の年代史を明らかにすることのできる日が近い将来やって来るかもしれません。私達はこのような事を研究しています。



(2) 地磁気・月磁気異常の成因に関する研究

地磁気を観測することによっても地球内部の様子を知ることが出来ます。地磁気は地球中心部の外核で作られています。外核は主に鉄で構成されていますが、高温のために液体として存在しています。液体金属である外核は活発に運動しており、電磁誘導による発電作用(ダイナモ)を引き起こします(図3)。このダイナモが地磁気を生成・維持するメカニズムです。地磁気は過去30億年以上前から存在しており、その間に極性を何度も反転させるなど非常にダイナミックに変動しています。上述の通り地磁気の変動は核の運動のダイナミクスの結果であり、核の運動から地磁気の変動を計算することができます。我々はコンピューターシミュレーションによって核と地磁気のダイナミックな現象を精密に表現できるダイナモを実現することを目指して研究を進めています。

また、現在月には地球のような固有の磁場は有りませんが、局所的に磁場の強い地域(磁気異常)が存在しています(図4)。月の磁気異常はどのようにして形成されたのでしょうか。その成因は月の起源や進化を理解する上で重要な情報を含んでいると考えられています。その一つに過去の月にも地球と同じように、核のダイナモによるグローバルな磁場が存在していたのか否かという月の科学上の大問題があります。この問題に答えることは月形成のモデルや材料物質の量、月の熱進化に関する制約条件となります。私達は我が国の月周回衛星かぐやに搭載された月磁力計(LMAG)によって取得された月磁場のデータを詳細に解析することによって、月の起源・進化の解明に迫るべく研究に取り組んでいます。

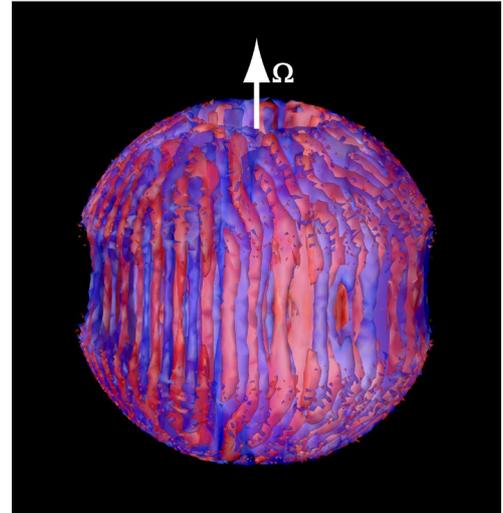


図3 数値シミュレーションによる外核中の流れの構造。青色は時計回りの渦、赤色は反時計回りの渦を表す。矢印は自転角速度ベクトル。

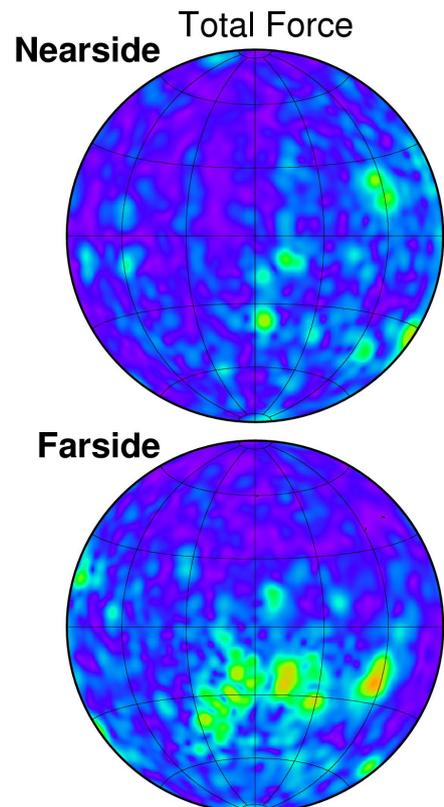


図4 かぐや衛星搭載の月磁力計による月の磁気異常図。(上)表側;(下)裏側。

地球内部ダイナミクス 地球内部の流れをデータ解析と 数値シミュレーションにより探る

スタッフ

准教授

吉田 茂生

地球の内部ではさまざまな運動が起こっています。たとえば、外核内の流れによって地球の磁場が出来ています。マンツルの流れは、プレート運動や地震などの現象と関連しています。火山の噴火や火山に伴う温泉は、私たちが目にするのできる流れです。地球惑星科学の授業を受けたことのない方も、こういった現象についてテレビや新聞等を通してある程度知っているとと思います。しかし、実際どのような流れが地球（あるいは惑星）の内部で生じているのか、それがどのように観察される地学現象に関係しているかなど、私たちが理解していないことがたくさんあります。

当研究分野では、地球内部のさまざまなダイナミカルな現象を理解するために、以下のような研究を行っています。

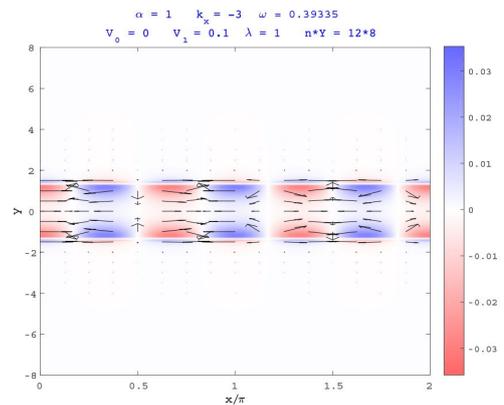


図1 外核最上部の安定成層内に発生する波のパターン。縦軸は緯度方向で中央が赤道、横軸は経度方向。波はある緯度の範囲内にトラップされる。

(1) 地球のコアのダイナミクス、マンツル対流のコアへの影響

コアは直接見ることができませんが、磁場の変化や地震波の伝わり方を通じて、中で起こっていることを間接的に推測することができます。

(1a) 外核の一番外側には成層が安定な層がある可能性があります。もしそのようなものがあれば、観測される磁場にはその影響が大きく出てくるはずですが。そこで、そのような成層内部のダイナミクスの基礎過程として、波動伝播の性質を調べています (図1)。

(1b) 内核の内部の地震波の伝わり方が方向によって異なることから内核の中にも流れがあるのではないかと考えられるようになってきました。私たちは、それが外核の対流によって引き起こされていると考えています。そのメカニズムを研究しています (図2)。

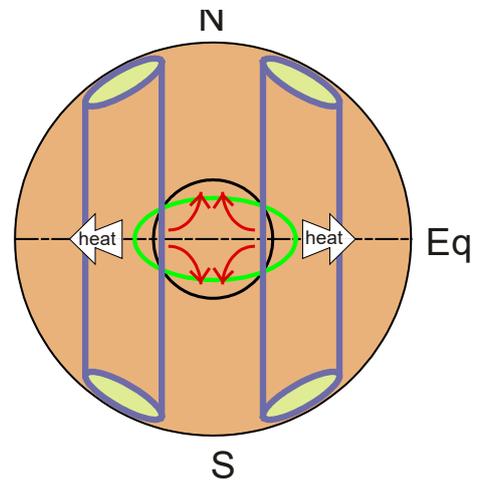


図2 外核のロール状流れの影響で、内核の中には赤道から極へ向かうような流れができると考えられる。外核に図のような流れがあると、赤道方向に熱が奪われる。そうすると内核は赤道方向に成長する。ところが重力があるために内核内には球に戻ろうとするような流れが出来る。

(1c) 地球の外核では地球磁場が作られています。このメカニズムは、近年の数値シミュレーションの発達によってだいぶ解明されてきましたが、結果の解釈は依然として難しいという状況です。その解釈に寄与するような基礎過程の研究をしています。

(1d) 外核の流れはマンテル対流の影響を受けています。そのことによって磁場のパターンとマンテル対流のパターンを比較することによって推測できます。おそらく、マンテル下部の熱境界条件の不均質が外核の中に流れを引き起こしているのだろうと考えられています。その基礎過程を研究しています。

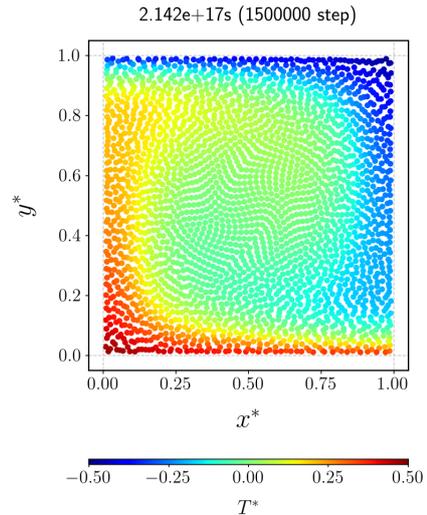


図3 SPH法による熱対流計算の結果。色は温度を表す。下面を温めて、上面を冷やすことで対流を起こしている。粒の一つ一つが計算ノードで、流れとともに動く。この計算では、時計回りの対流が出来ている。

(2) コア形成のシミュレーションを目指した数値計算法の開発

地球ができた時にコアが形成される過程のシミュレーションを目指して、粒子シミュレーション法の一つであるSPH (smoothed particle hydrodynamics) 法の改良を行っています (図3)。微惑星が原始地球に衝突するのと同時にコアができてゆく様子を数値計算できるようにすることが目標です。

(3) 火山噴火や熱水循環のダイナミクス

火山噴火や熱水循環 (温泉水の流れ) は、地下のダイナミクスを直接感じさせてくれる現象です。流れが相変化や化学変化の影響を大きく受けています。

(3a) 爆発的噴火において、噴火が断続的に起こるメカニズムを理論的に研究しています。泡とマグマの相対運動が重要な役割を果たしていることがわかってきました。

(3b) 海底火山の近くには温泉が湧いています。この水を熱水、その水の流れを熱水循環と呼びます。熱水は、元をたどると海水なのですが、流れてくる途中で石と反応したり、海水が薄い塩水と濃い塩水に相分離したりすることによって、いろいろな組成の熱水が出来ます。それから、場所によっては地下に熱水だまりがあることも確認されています。そこで、硬石膏の沈殿物により熱水だまりができるようすの数値シミュレーションをしました (図4)。

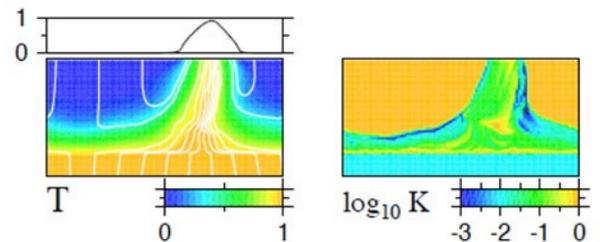


図4 海底熱水循環のシミュレーションで硬石膏の沈殿物によって熱水だまりができたようです。左の図の色は温度分布、白い線は流線である。左上のグラフは海底に噴出する液体の温度を示す。右の図は、沈殿物の量を示す。青いほど沈殿物が多くなっていることを示す。

岩石循環科学 岩石から固体地球の運動を探ろう

スタッフ

教授

寅丸敦志

准教授

池田 剛

助教

宮本知治

固体地球の多くの部分を構成している岩石は、地球の長い歴史の中でさまざまな運動を経験してきました。その運動をいろいろな手法を用いて理解し、固体地球の営みの背後に隠されている普遍的法則性を見つけ出すのが私たちの研究室の目的です。研究においては、従来の手法や考え方にとらわれない手法の開発、モデルや考え方の提出、天然から新しい法則性を示唆する事実を発見することが大変重要であると考えており、このことを意識した研究・教育を行っています。

(1) 固体地球の流動と化学反応のカップリング

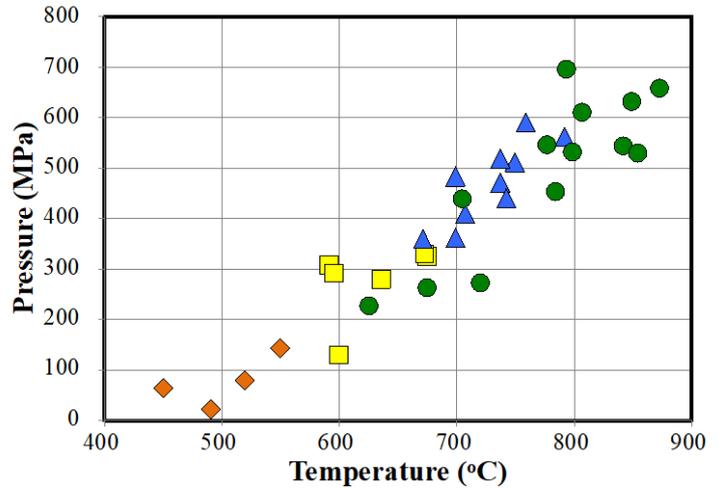
古来より不動の象徴と詠まれてきた大地も、20世紀後半には年間数センチメートルの単位で相対運動していることが明らかになりました。並進運動でなく相対運動であるということは、固体地球が伸びたり縮んだりしているということです。浅所においてはその歪みを断層という岩石の脆性変形が担っていますが、深所では塑性変形が卓越しています。塑性変形する岩石では、鉱物どうしの化学反応や流体と岩石の相互作用などの様々な素過程が、岩石組織を形成していきます。

当研究室では、過去の深所で作られた岩石（変形岩、変成岩）を対象として、深所で実現されていた温度、圧力などといった状態量、およびそこで支配していた素過程を明らかにすることを目的としています。



様々なスケールで生じる岩石の流動 (左:長崎県西彼杵, 中:福岡市能古島, 右:スコットランド)

現在の岩石は形成当時の温度や圧力を残していません。その代わりに形成当時の鉱物種やその化学組成を保存しています。鉱物の化学組成は鉱物の組み合わせや温度、圧力によって変化するので、逆に、鉱物の化学組成の情報から形成当時の温度や圧力を推定することができます。

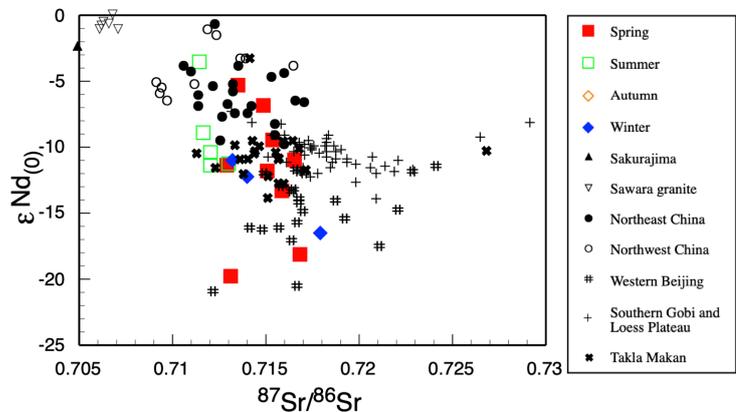


温度・圧力推定の例：約1億年前の環太平洋域の地殻の温度・圧力

(2) 岩石の成因と履歴の解明

岩石は主要10元素とその他の微量元素から構成されます。その量比には規則性があり、その規則性は岩石を構成する鉱物の種類と量比に、そして岩石の成因に関係します。対象が火成岩ならば起源となるマンツルの違いやその後の分化の過程が岩石の化学組成を特徴づけますし、変成岩ならば変成作用における物質移動・同位体均質化の過程が組成的特徴として残っているのです。いずれも地下深部における現象で直接観察することが出来ませんが、現象の実体を明らかにするために岩石を元素レベルで解像して観察するのです。そして岩石が経験した事象を履歴として地史を編むのです。

岩石の成因を考察する上で、岩石の組織もまた重要な情報源です。岩石の分析値は様々な情報を持った岩石の特徴を定量化した結果ですので、分析の際に数値では表現できない情報を消去しています。岩石が成長した過程を残す組織、そしてその結果である組成、その両者を有効に矛盾無く体系化することで岩石成因の真実を理解できるのです。



脊振山頂で採取した風送塵(黄沙など)のSr・Nd同位体組成と砂漠や火山灰の組成の比較。組成の違いから、風送塵の起源と季節変化を探ることができる。

岩石に関わる情報を応用することもまた重要です。岩石の状態をよく理解することで、熱水変質などの影響で岩石が目前で変化する様子を確かめ元素が移動する過程を探ることもできます。岩石を起源とする物質が環境に及ぼす影響を考察することもできるようになります。或いは自然科学を離れて、人間が自然を利用して生活してきた様子を想像することも出来るかもしれません。岩石の基本を学んで、そのような事象を考察して理解を深めるのです。

地層記録から地球史・地球環境・テクトニクスを解読する

スタッフ

教授 尾上哲治

准教授 清川昌一

助教 佐藤峰南

地層は、地球表層部で生じたさまざまな環境変動を記録する最も優れたレコーダーです。地球表層部には、さまざまな周期で、テクトニクスや気候変動、天体衝突などのイベントを反映した地層が形成されます。これには、断層や褶曲などの変形構造と共に、海水準や生物多様性の変動が、堆積サイクル、碎屑物の組成変化、含まれる化石遺骸の記録として地層に保存されます。本研究分野の研究は、浮遊性微化石や同位体を用いた地層年代の決定、堆積造構環境を明らかにするための堆積相・変形相データの収集、碎屑物の組成の解析などを通して、地層中に残された変動記録を高い精度で解読し、地球表層部の進化過程を研究します。研究の対象となる地域には、国内の古～新生界はもとより、海外の先カンブリア時代の地層を始め、様々な地域と時代を含みます。本分野では、地層記録から地球史を明らかにするために、以下の様な研究を行っています。

(1) 大量絶滅の研究

顕生代には、何度かの大量絶滅を引き起こした海洋環境変動が報告されており、それらは、大規模な火成活動、隕石衝突、大気・海洋表層における酸素濃度の急激な低下などが原因と考えられています。これらの環境変動は、堆積岩中にイジェクタ層や黒色頁岩層(図1)といった特徴的なイベント堆積物として記録されており、それらを詳しく調べることにより、どのような環境変動が大量絶滅を引き起こしたかを知ることができます。本研究分野では、放散虫(図2)やコノドントといった微化石と、堆積学・地球化学的な手法を利用して、堆積岩に記録された環境変動と大量絶滅との関連性を解明する研究を進めています。



図1 海洋無酸素事変を記録したイタリア白亜系石灰岩中の黒色頁岩(矢印)。

(2) 堆積岩中の地球外物質に関する研究

地球進化史分野では、地球環境の大変化が予測できる地球外物質の寄与、つまり天体衝突や宇宙塵の大量流入といったイベントが、地球環境と生命に与えた影響についても研究を進めています。6500万年前の白亜紀末に、巨大隕石の衝突により恐竜絶滅が起こった説は有名です。最近では本研究分野の学生により、恐竜時代の黎明期にあたる約2億1500万年前の地層から、直径7 kmという巨大隕石が衝突した証拠が世界で初めて発見されました。このような天体衝突履歴の解読のみならず、堆積岩に保存された“宇宙塵の化石”から、太陽系での物質分布や移動の歴史も明らかにすることを目指しています。

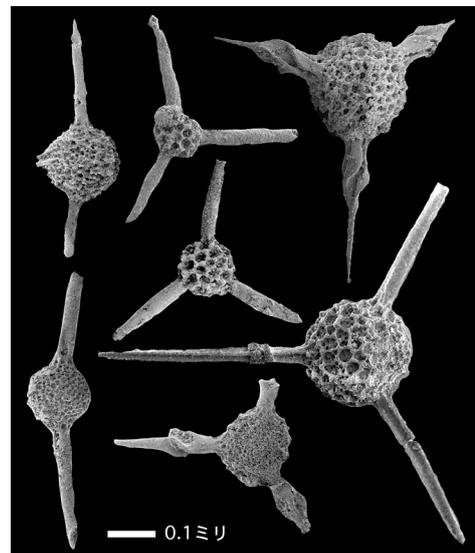


図2 後期三畳紀の放散虫化石種の一例。

(3) 失われた海洋底の環境記録

地球表層の7割は海洋地殻からできている。しかしプレートの沈み込みのために、1.8億年以前の海底環境を紐解くには、陸上に残された海洋底の記録を見つけ出す必要がある。日本列島には、付加体の一部として、海洋底起源地層が残されている。この失われた海洋底記録について、詳細な地質調査と年代情報を決める事で、失われた古海洋の地球環境記録を明らかにし、汎世界的な地球環境変動の解明を目指しています。

新生代 : 浅海域の生態系および環境復元

中生代 : 温暖化海洋の環境復元

古生代 : パンサラッサ海洋の復元

新新生代 : スノーボールアース時代

中新生代 : 安定化大陸時代

古新生代 : 大酸化事変

太古代 : 大陸の形成と酸素濃度上昇史

調査場所 : オーストラリア、カナダ、南アフリカ、
ガーナ、エジプト、ブラジル、東チモール、カリブ
海、日本列島各地 etc.

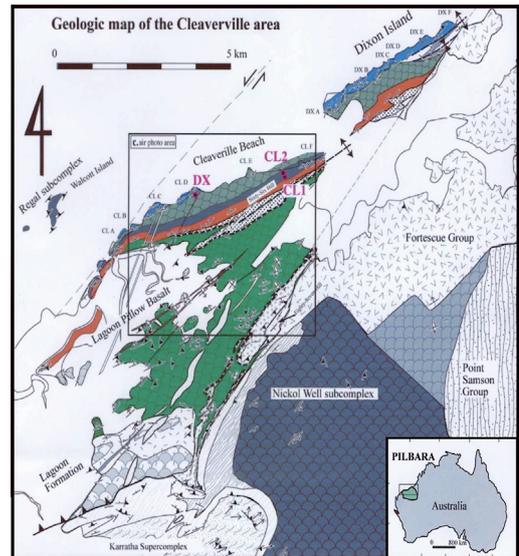


図3 オーストラリア西部クレバービル地域の太古代の地質図。太古代のコマチアイト質海洋底玄武岩(緑色)の上位に縞状鉄鉱層(BIF:赤色)や黒色チャート層(暗灰色)が重なる。Kiyokawa & Taira (1998)を簡略化して示す。

太古代 原始海洋 : 細菌の仲間のシアノバクテリアの活動により酸素の供給が始まりました。酸素は、原始海洋中に大量のイオンとして含まれていた鉄を酸化させ、太古代の海洋底に縞状鉄鉱床(BIF)を形成しました。BIFの出現は、地球の原始海洋での大きな変化を示します。BIFがどのような海洋環境下とメカニズムで生成するのか、などはまだ十分に明らかではありません。この分野では、当時の原始地球環境が地層記録としても最もよく保存されているオーストラリア西部のピルバラ・クレバービル地域(図3)やアフリカ、バーバートン帯が調査地域である。

原生代 海洋環境 : 原生代は大陸の安定・分裂の時代になります。初期には酸素濃度上昇事変がおこり、海洋表層では生物が発生、海底はその分解により酸素が奪われ、無酸素でより硫化物に富むユーキシニック海洋になると言われています。大陸分裂時には大プルーム活動がおこり、ロディニアなどの超大陸の形成分裂もおこります。スノーボールアース事件も、地球表層環境の暴走事件として不安定な地球環境の記録を残しています。海底地層はこれらの記録が唯一保存されているタイムカプセルであり、これらの記録をいろいろな手法を使って、解きほぐしていきます。

顕生代 生態系と海洋環境 : 顕生代に入ると大型生物が誕生します。特に沿岸生態系を支える造礁サンゴや二枚貝、海綿が形成する生物礁とその炭酸塩骨格には過去の生物群集、海洋環境が記録されています。地球環境変動に対する生物応答を読み解き、将来予測に役立てるための研究を行います。

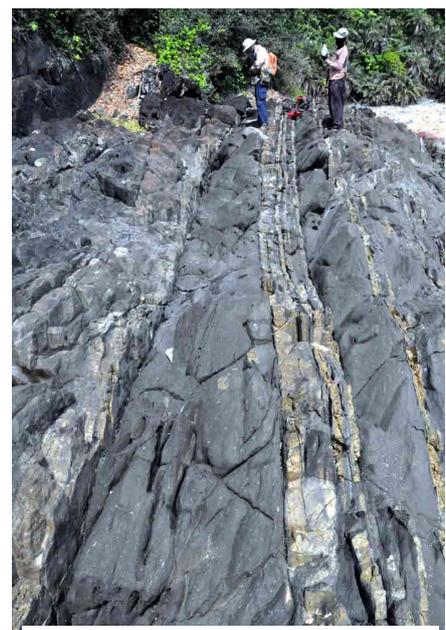


図4 23億年前の海底堆積層の分布状況(ガーナ)。

(4) 現在進行形の地層形成記録

鉄沈殿と海洋酸性化（薩摩硫黄島・鬼界カルデラ）

7300年前に起こった巨大カルデラ噴火（鬼界カルデラ）の痕跡について、海洋調査をもとに行っており、海底地形・音波探査により海底に埋もれているカルデラ噴火史を明らかにし、カルデラ噴火の周期やそれぞれの規模を決定し、将来の予知に役立てます。

また、カルデラ周辺の現在の地質現象に注目し、1) 鉄沈殿の現世のアナロジーである鹿児島県硫黄島の海底火山活動域において a) 鉄沈殿メカニズム：熱水活動の長期観測・気象条件などとのリンクに

よる沈殿作用の解明、b) 熱水活動と生物活動：チムニーマウンドでのバクテリアの生物活動の解明、c) 野外証拠の収集と採集した試料の地球化学的分析を通して、原始海洋環境の復元と考察、d) 酸化海洋と生物活動：サンゴ礁は生物が作る地球上で最も大きな炭酸塩岩の構造物であり、現代において最も生物多様性の高い海域の基盤となっています。海洋酸性化は造礁サンゴをはじめとする炭酸塩の殻を形成する生物にとって脅威となると考えられてきました。硫黄島周辺における強酸性温泉水がもたらした酸性海洋の生物活動の長期調査から、温暖化が海洋生物に与える影響の変化予測を試みています。



図5 現在の鉄沈殿場：鹿児島県薩摩硫黄島（鬼界カルデラの外輪山が陸上にみられる。酸性温泉が流出し、海洋が酸性化している。

(5) 小惑星衝突と地球環境変動

地球史を通じた生命進化は、地球環境異変とそれに続く大量絶滅によって駆動されてきました。しかし、環境変動を引き起こした主な要因や、絶滅から多様化へ至る過程は各時代で異なるシナリオが提案されています。そのため、生物大量絶滅が記録されている時代境界の連続堆積物試料を高時間解像度でサンプリングし、小惑星衝突に鋭敏な地球化学的トレーサーとなる元素濃度・同位体比データの蓄積を進めています。また最近では、小惑星衝突イベントの履歴を効率的に復元するため、新たな微量元素測定法の開発にも取り組んでいます。地質学と宇宙化学を融合させた研究により、大規模な小惑星衝突にともなう大気-海洋系の変動メカニズムや、生態系の応答を明らかにすることを目指しています。



図6 白亜紀の陸成層（アメリカ・ノースダコタ州）における化石発掘調査および試料採取。

人間活動による土地利用や大気組成の改変は、地球環境変動に顕著な影響を与えるようになっており、新しい地質年代として人類の時代を意味する **Anthropocene** が提案されるまでに至っています。変わりゆく地球環境をモニターするため精力的な観測が行われていますが、地球の気候や環境は観測記録よりも長い時間スケールで変化することが知られています。人間活動の影響がない自然の地球環境変動の実態を理解するためには、過去の気候や環境の情報を地質記録から読み解くことが有効な方法です。本研究分野では、主に海洋の堆積物から新生代の地球環境変動を復元する古環境研究を行っています。

(1) 環境レコーダーとしての堆積物と微化石

長い時間をかけて降り積もった海底や湖底の堆積物は、過去の地球環境変動を記録する天然のレコーダーです（図 1）。堆積物中には、微化石と呼ばれる肉眼では観察できないほどの小さなプランクトンの化石が豊富に含まれています（図 2）。これら微化石を分類し、群集組成変化を丹念に調べたり化学分析を行ったりすることで、彼らが棲息していた当時の環境や気候の変動史を解読する手がかりが得られます。

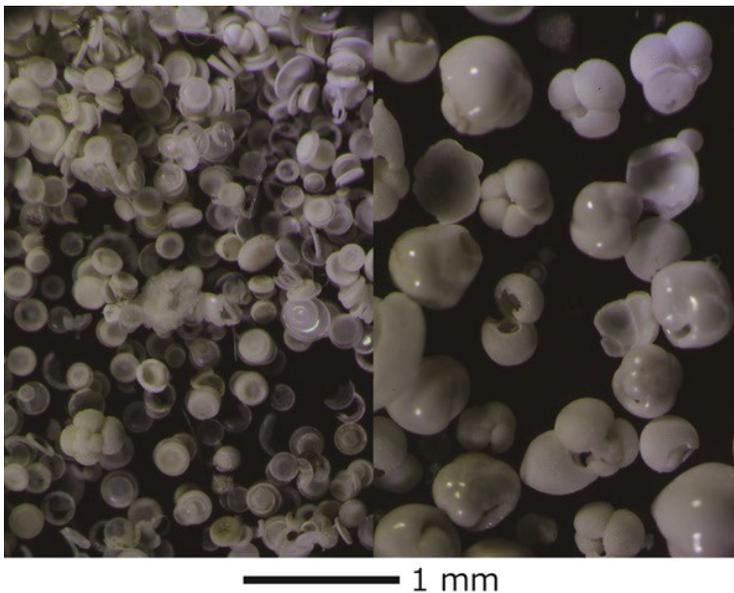


図 2. (左)珪藻殻（ケイ酸塩）に富む堆積物と、
(右)有孔虫殻（炭酸カルシウム）に富む堆積物



図 1. 九州の南東 400 km に位置する九州 - パラオ海嶺北部で採取された過去 15 万年分の堆積物（長さ 460 cm）。巨大噴火による火山灰層がいくつか見られる。

(2) 古海洋環境の復元研究

深海底は陸上や浅海と比べて環境が安定しているため、長期間にわたり連続的に堆積物が堆積しやすいという特徴があります。このため 1000 年から数万年スケールを中心に新生代の環境変動を復元するのに適しています。深海底堆積物を採取するためには、研究船を用いた大掛かりな調査が必要となります。そこで、国内外の研究者とチームを組み、協力して海底堆積物を採取します。得られた試料は、共同作業で基礎データを取った後、各研究室に分配し、それぞれの得意とする分析を行います。当研究室では、主に珪質微化石群集（放散虫・珪藻・珪質鞭毛藻）や堆積物の主要化学成分、および有孔虫殻の安定同位体比分析を行っています。より正確な過去の海洋環境復元像を得るため、研究チームのメンバーが様々な分析データを持ち寄り、多方面からデータの整合性を検討します。このような共同研究が古海洋研究の大きな特徴です（図 3）。

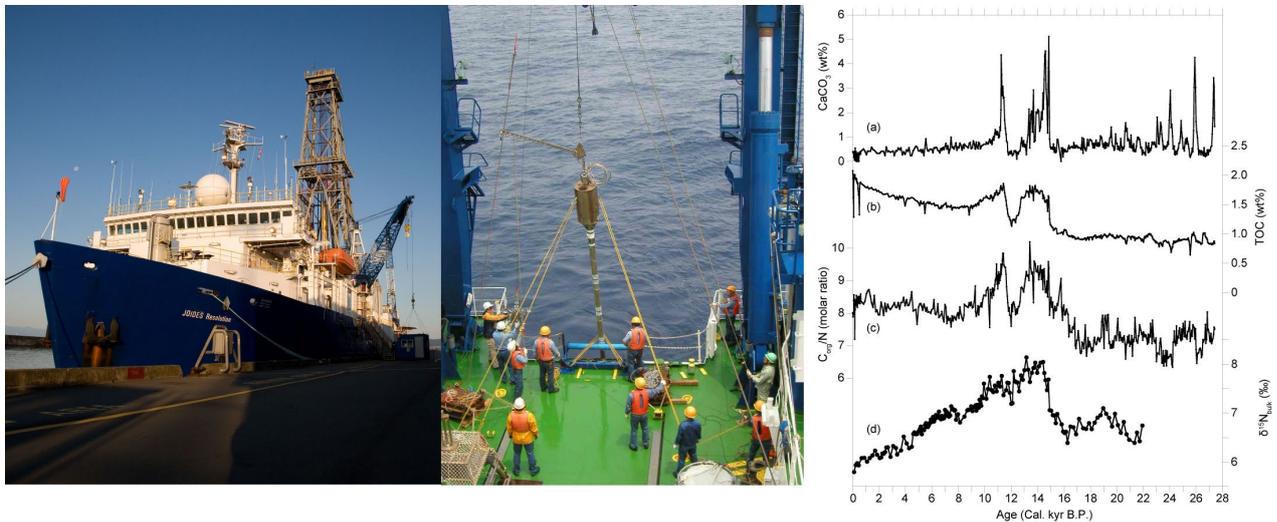


図 3. (左) 掘削船 JOIDES Resolution 号、(中央) ピストンコアによる海底堆積物採取の様子、(右)海底堆積物の分析データの例

(3) 海洋沈降粒子の研究

外洋の海底堆積物は、プランクトンの遺骸や黄砂のような風成塵が、海洋表層から沈降し、1000 年間に数 mm から数十 cm という速度でゆっくりと堆積しています。この沈降過程には、プランクトン粒子が凝集してできるマリンスノーと大型動物プランクトンの糞であるフィーカルペレットが重要です。個々の微小粒子がマリンスノーとフィーカルペレットとなりサイズと密度が増すことで、粒子が海中を沈降できるからです。海洋表層で植物プランクトンは光合成をおこない大気中の二酸化炭素を有機物として固定します。植物プランクトンの遺骸がマリンスノーとフィーカルペレットとして深海へ輸送されることで二酸化炭素を大気から深海へと隔離する働きがあり、地球表層の炭素循環における主要な要素となっています。本研究室では、セディメントトラップという装置を用い、海洋沈降粒子の季節・経年変動を調べる研究を行っています。

火山科学 マグマが躍動するダイナミックな火山現象に迫ろう

スタッフ

教授
助教

下司信夫
大橋正俊

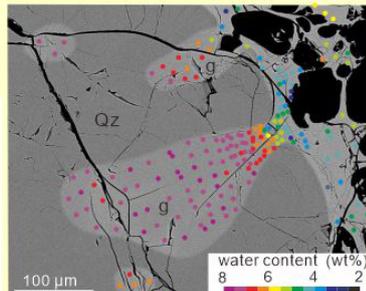
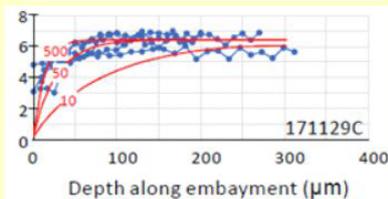
地下深くからマグマが上昇し、地表へと噴出する火山活動は、“動かざること山の如し”ともいわれる固体地球の極めてダイナミックな営みを目の当たりにできる自然現象です。その活動を支配するメカニズムを物理学的・化学的理論を用いて、地質学的・マグマ学的な視点から解き明かしてゆくことが私たちの目標です。火山噴火を理解するためには、こうしたマグマが関与するあらゆる過程を理解する必要がありますが、本研究分野では主として次の研究を行っています。

(1) マグマの蓄積と上昇・噴火のメカニズム

マグマが地下深くから上昇して火山引噴火を引き起こすまでには、マグマの発泡により発生する浮力や、結晶化によるマグマの物性の変化、まわりの岩盤にかかる応力などとのあいだでさまざまな力学的な応答があり、それが地下でのマグマの蓄積や上昇・噴火発生メカニズムを決めています。

私たちは、微小な領域の化学組成分析から、火山全体の地質構造解析までさまざまな手法

火山噴出物の微小領域の組織・組成分析



結晶に取り込まれたメルトに残された水の分布をつかって、鹿児島島の始良カルデラをつくった約3万年前の巨大噴火の軽石からマグマ溜まりの圧力変化を読み取ります。南九州を壊滅させた巨大噴火の引き金となったマグマ溜まりの崩壊はなぜ起こったのでしょうか？小さな結晶の中にそのヒントが隠されていました。

法を駆使して、マグマの挙動を復元して噴火のメカニズムに迫る研究を行っています。そして噴火が発生したときには、そのような研究手法を用いて噴出物を迅速に解析し、いま起きている噴火がどのようなメカニズムで発生しているかをすばやく読み取ります。そうして得られた噴火メカニズムに関する情報は、噴

阿蘇中岳



桜島



諏訪之瀬島

九州には多くの活動的な火山があります。それぞれの火山はどのようなマグマがどのようなメカニズムで噴出しているのでしょうか？噴出物の詳細な解析から、九州を初めとする日本や世界各地の火山活動のメカニズムに迫ります。手がかりは火山が噴出する火山灰や軽石といった噴出物です。

火防災にとっても欠かせないものとなります。また、遠い地質時代の噴出物に対しても同じ手法を用いることで、現在の噴火と同じようにその噴火メカニズムを探ることができるのです。

(2) 観察・実験・計算に基づく火山学

火山噴火は元来、熱力学・流体力学・弾性体力学などの幅広い物理に支配され、なおかつ、それらが相互に依存する複雑な物理現象です。軽石やスコリアといった火山噴出物からマグマ運動の履歴を読み解くには、噴出物を丁寧に観察すると同時に、幅広い視点から物理モデルを検証する必要があります。私たちは、火山噴出物の気泡組織・結晶組織を丁寧に観察し、さらに実験・理論に基づいたモデル化を行うことで、火山噴火のダイナミクスを解明しようと試みています。

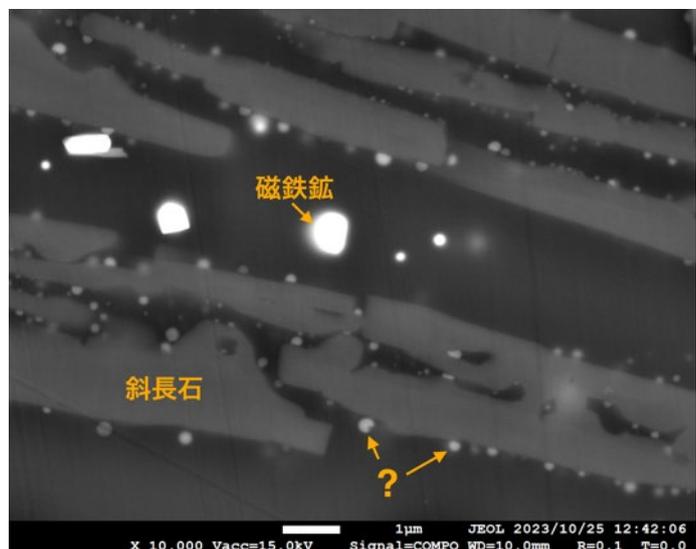
気泡のダイナミクス

最近、特に気泡のダイナミクスを中心に、研究を進めています。具体的には、New Zealandの Taupo 火山で噴出した軽石を解析して、気泡形状のデータを取得しました。軽石に含まれる気泡形状は、マグマが地表に上がってくる過程の流動履歴を反映していると考えられます。この形状のデータを元に、マグマの流動履歴を復元するような数値計算を行いました。また、実際のマグマを使って火山噴火を再現することは難しいので、マグマの代わりとなる物質（アナログ物質）を使用したアナログ実験も行っています。水飴やシリコンオイルなど、簡単に手に入れられる粘性流体を用いた減圧実験を行い、気泡合体タイムスケールを新たに提案しました。試行錯誤しながら自分で実験装置を作り、実験を実施・解析することができるのが醍醐味です。



マグマの結晶化

火山噴出物の組織観察を通し、マグマの結晶化過程も研究しています。溶岩や軽石といった噴出物には様々な結晶が含まれています。技術の発展により、今まで見る事が出来なかった結晶・ガラスまで見る事が出来るようになりました。例えば、右図はスコリアの電子顕微鏡写真です。灰色の斜長石の周りに、何か球状のお饅頭みたいな物体が付着しています。これは、そもそも結晶でしょうか？ また、この物体は磁鉄鉱には付着してないのは、なぜなのでしょう？



観測地震・火山学および地震火山減災科学研究分野の主たる研究活動拠点は、地震火山観測研究センターです。地震火山観測研究センターは国が策定する地震予知・火山噴火予知計画に基づいて全国10の国立大学内に設立された観測・研究・教育のための施設の1つです(図1)。本研究分野の学生は、原則として伊都キャンパスで研究・指導を受けますが、本人の研究テーマによっては長崎県島原市にある観測所に在住して研究することも可能です。

本研究分野では、地震予知・火山噴火予知の基礎となる、地震発生・火山噴火のメカニズムの解明を様々な手法を用いて研究し、知見を社会に還元することで災害の軽減(減災)に役立っています(図2)。



図1

(1) 九州の地震活動と地下構造

地殻内の地震活動は別府から雲仙に至る別府-島原地溝帯に沿って活発です。その震源メカニズムはおおよそ南-北方向に伸張する軸をもち、この地域で起こる地震が南北に引っ張られて生じていることを示しています。また別府-島原地溝帯の西端にある雲仙地溝は年間約1.4cmずつ南北に伸びていることが地殻変動データから分かっています。九州東方の日向灘から九州内陸の深部にかけては、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震が観測されます。フィリピン海プレートは、九重、阿蘇、霧島、桜島などの火山列下では100-150kmの深さに達しています。

深さ20kmでは活火山に沿って低速度域が見られます。深さ50kmでは九州東岸の沖に沈み込むフィリピン海プレートに対応した高速度域が、九州東岸に沿って低速度域が見られます。この低速度域は蛇紋岩化したマンテルウェッジの存在を示唆しています。プレート沈み込み方向に沿った断面でも沈み込むプレートでの高速度域やマンテルウェッジでの低速度域が確認されます。

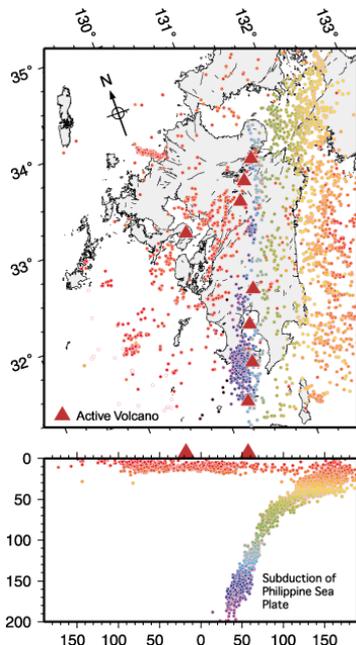


図3九州地区で発生した地震の分布

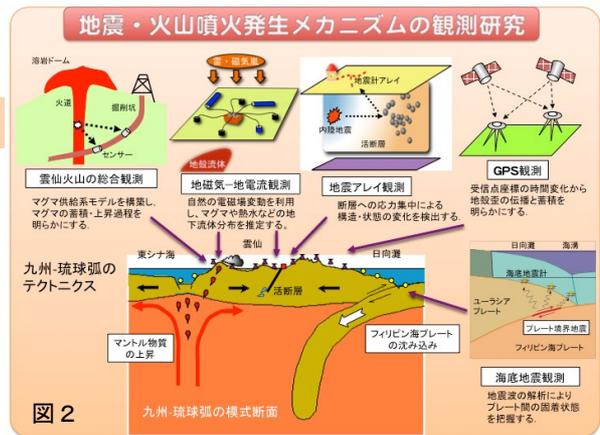


図2

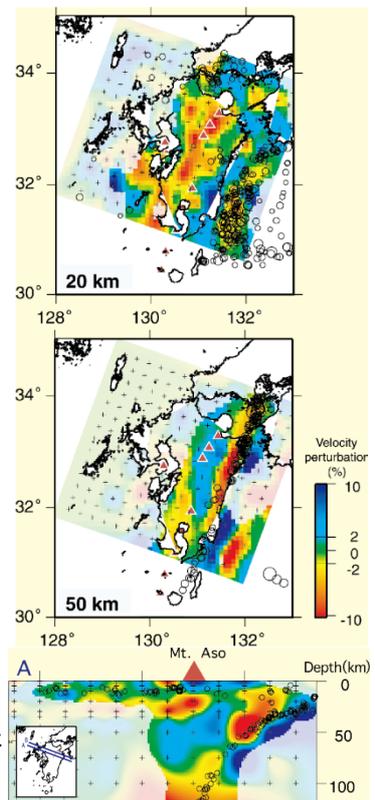


図4トモグラフィー解析による九州の地下速度構造

(2) 雲仙火山のマグマ供給系とマグマ蓄積過程の解明

火山はひとたび噴火すると、甚大な被害をおよぼすことから、火山噴火の予知は非常に需要です。これまでの研究で、火山噴火の前兆については検知がある程度可能になりつつあります。しかし、マグマ供給系（マグマ溜まりや火道などの位置・形状・物性）やマグマ上昇プロセスや蓄積率（マグマの収支）に未解明な点が多いため、確度の高い予知は容易ではありません。

本センターでは、地震や地殻変動の観測データから1990年から95年にかけて活動した雲仙火山のマグマ供給系の高解像度イメージングとモデル化を行っています。そして再びマグマの蓄積期に入ったと考えられる雲仙火山深部のマグマ供給率を推定し、次の雲仙火山噴火に至る準備過程の解明を目標としています。

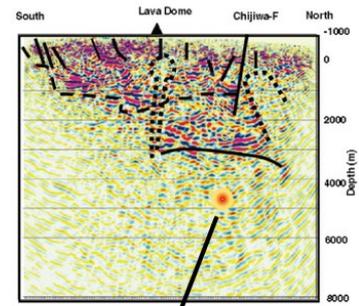
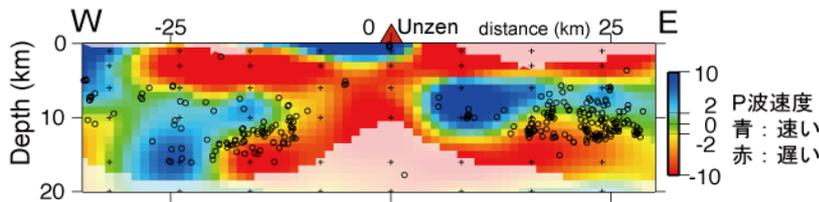
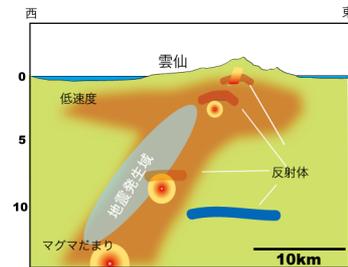


図5 反射体イメージング



↑ 図6 雲仙火山直下の構造モデル

← 図7 地震波速度トモグラフィ結果

(3) 2011年霧島火山・新燃岳噴火の観測研究

九州南部の霧島火山の新燃岳は2011年1月、52年ぶりに爆発的噴火を起こし、本格的なマグマ噴火が始まりました。地下から湧き出たマグマは火口を満たし、しばしば大きな空振をともなう爆発を起こしました。

本センターでは地震および地殻変動の観測機器を多数設置して調査しています。また岩石循環科学研究分野と連携して、火山灰・噴石のサンプリングを行っています。

火口から約3km離れた新湯地区に設置された地震計アレイは25台の地震計からなる観測システムで、地下のレーダーのように微小な地震波を検知し、火山性地震や微動の到来方向や深さを把握することができます。

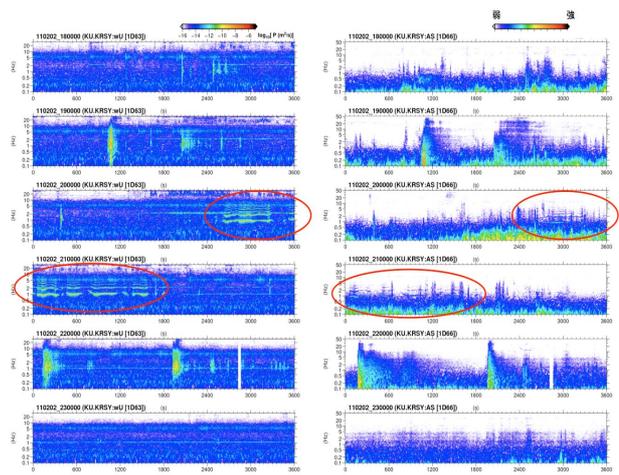
また地震計・空振計のデータの一部は気象庁や大学合同観測班に即時伝送され、火山噴火状況の把握や予測に役立てられています。観測により得られた研究結果を火山噴火予知連絡会に逐次報告するとともに、マスコミやホームページを通して一般に調査成果を還元しています。



← 図8 活発な噴煙を上げる新燃岳(2011年1月28日)

→ 図9 新湯観測点で記録された地震・空振動のランニングスペクトル解析

↓ 図10 地震観測装置

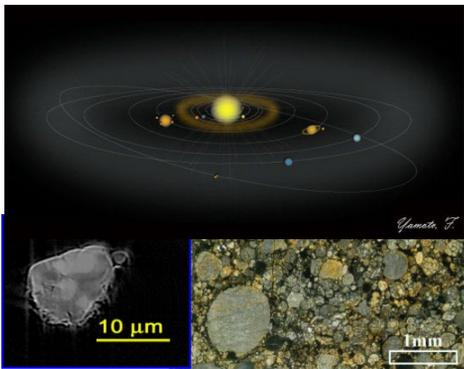


広帯域地震計(上下動)

空振計

太陽惑星系物質科学 専門分野

- 惑星系形成進化学
- 有機宇宙地球化学
- 地球システム化学
- 地球内部物質学



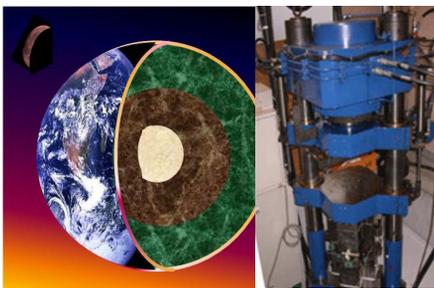
隕石・宇宙塵
惑星形成
生命起源物質



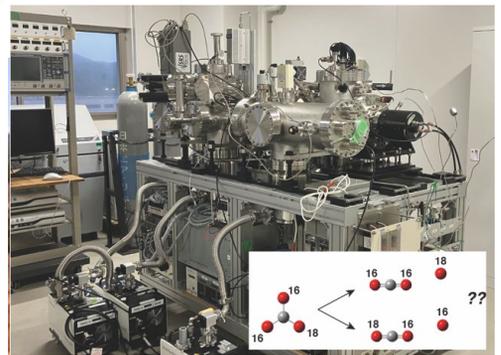
初期地球
極限物性
天体内部



地球史と生物環境の
起源と進化



地球四次元解析



太陽惑星系物質科学 専門分野

各研究グループの研究内容の概略

研究グループ	研究内容
惑星系形成進化学	理論物理学的手法, 数値シミュレーション及び地球外物質(隕石)の分析による太陽系及び系外惑星系の起源・進化の研究
有機宇宙地球化学	有機物の前生命的合成や隕石有機物の解析による化学進化, 古細菌の生物有機地球化学, 有機物の同位体地球化学と生命環境
地球システム化学	地球の形成から現在まで, また, 地球の深部から表層まで, 化学の目で地球を四次元的に調べる研究
地球内部物質学	高圧変形実験による地球内部の動的現象の解明、マントル対流と深発地震、岩石の破壊と流動、非平衡相転移、AE測定と放射光その場観察、惑星氷、衝撃変成隕石

各研究グループのスタッフ

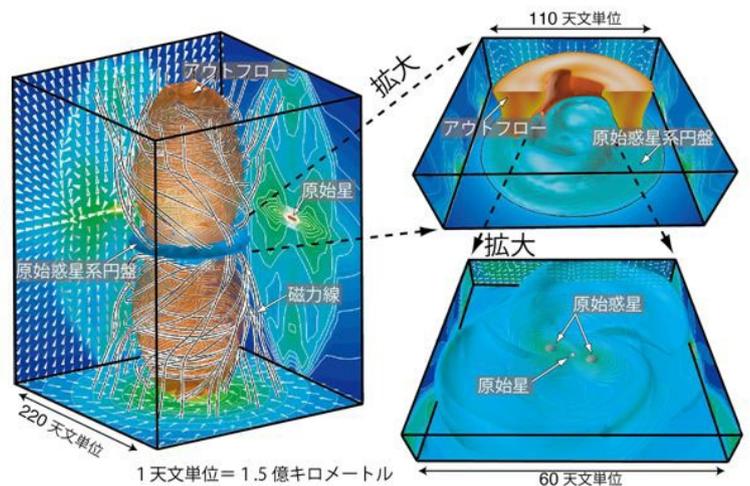
研究グループ	教授	准教授	助教
惑星系形成進化学	町田 正博	岡崎 隆司	山本 大貴
有機宇宙地球化学	奈良岡 浩	山内 敬明	北島 富美雄
地球システム化学	山本 順司	荒川 雅	
地球内部物質学	久保 友明		坪川 祐美子

スタッフ 教授 町田 正博 (理論系)
 准教授 岡崎 隆司 (分析系)
 助教 山本 大貴 (実験系)

太陽系は、太陽という中心星のまわりを公転する惑星、準惑星、小惑星、太陽系外縁天体などや、惑星のまわりを公転する衛星などから成る「惑星系」の一つです。最近の天文観測の発展により、太陽系以外にも中心星のまわりを惑星が公転する惑星系が多数あることが分かってきました。当研究分野では、惑星系の形成・進化過程を解明することを目指して、以下のような研究を行っています。

(1) 星と惑星が誕生する過程の数値シミュレーションと観測による研究

星や惑星系は、分子雲が自分自身の重力によって収縮することにより形成します。右図は、その過程をスーパーコンピューターで数値シミュレーションした結果です。図中左側のパネルで、白と黒の線は磁力線を、オレンジ色の部分は原始星アウトフローを示しています。星は誕生する瞬間に、磁場の力によってガスを放出します。このガスの速度は時速10万キロメートル以上です。図のオレンジ色の部分が放出されたガスに対応します。また、右下の



パネルから円盤の中で木星のようなガス惑星が2つ誕生しているのが分かります。このように分子雲コアの中で星が誕生し、星の周りに原始惑星系円盤が形成し、さらにその

円盤中で惑星が生まれるまでを計算し、様々な惑星系が形成過程を改名しています。

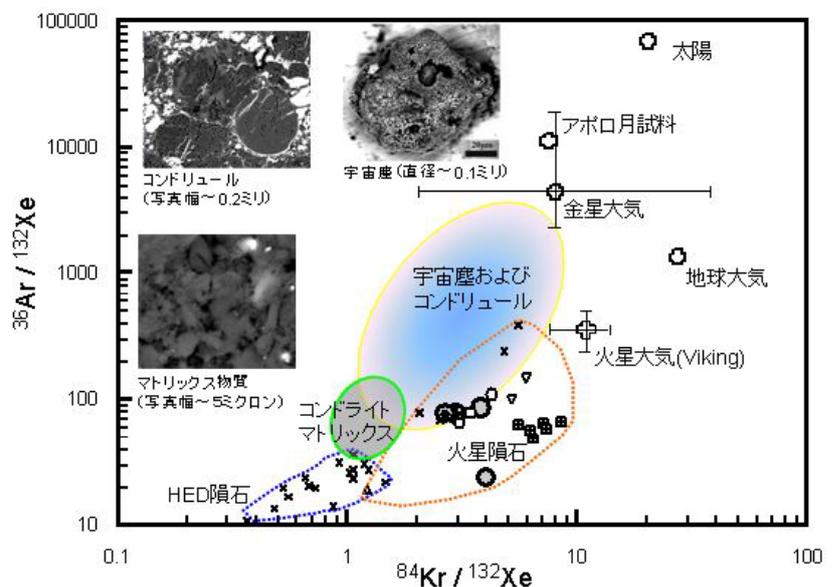
左の図は、我々がオリオン星形成領域で行ったALMA望遠鏡観測の模式図です。図の中心から左上と右上方向に生まれたばかりの原始星が存在しており、原始星からガスが激しく放出されている様子が分かります。また、アウトフローの先端(右下の部分)では、新しい星が誕生しつつあることが分かっています。このように数値シミュレーションと観測を比較することによって、星と惑星の誕生を解明しています。



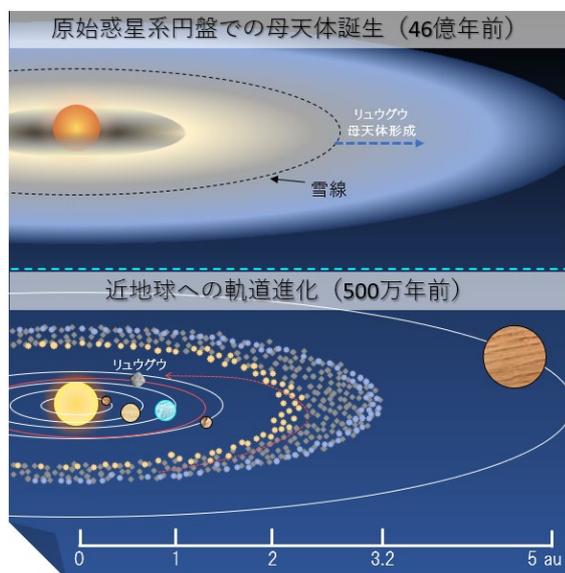
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO),
A. Sato et al.

(2) 地球外物質の元素・同位体分析による実験的研究

理論的研究や天文観測で得られる恒星や原始惑星系円盤、惑星系進化に関する情報と、我々の太陽系を比較・理解することは重要です。太陽系 46 億年の進化は、地球外物質の化学組成や同位体組成に記録されています。本研究室は微量（原子数で 5000 個あれば検出可能）の希ガス同位体分析が可能な分析装置を有する、世界でも珍しい研究室です。希ガス同位体は物質の起源を



決めるのに非常に有力な情報になります。例えば、太陽と地球大気、火星起源の隕石などは異なる元素組成を持っています（右上図）。また、希ガス同位体を「時計」として用いることで、天体が形成した年代や天体同士の衝突加熱の起きた年代、隕石が小惑星などの元々の天体から放出されて地球に落下するまでに宇宙空間を浮遊していた期間などを決めることができます。

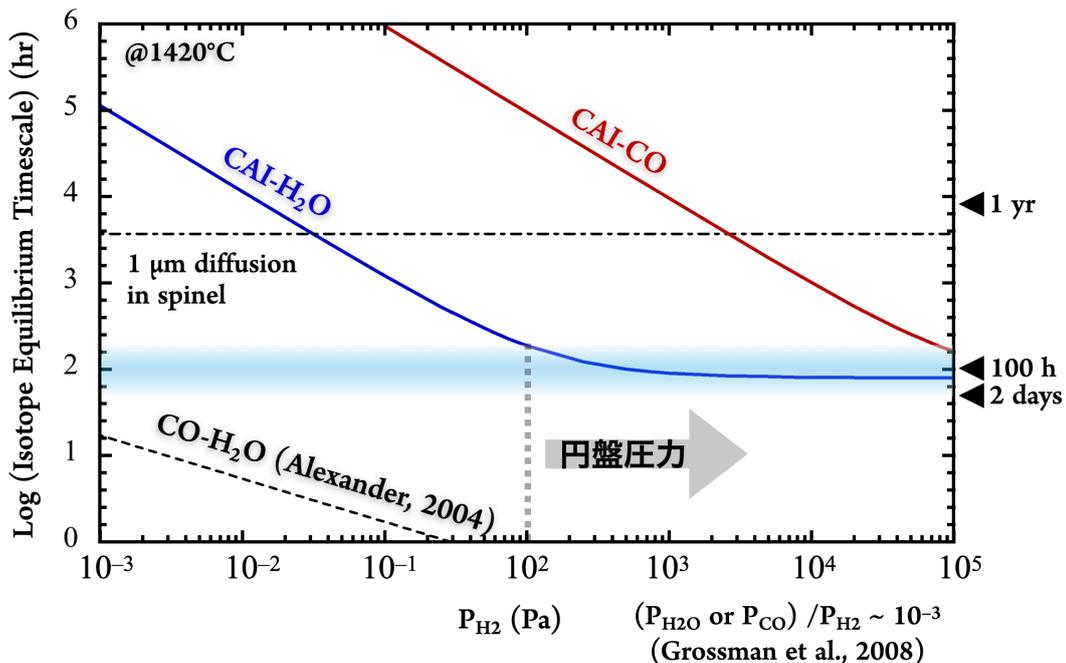
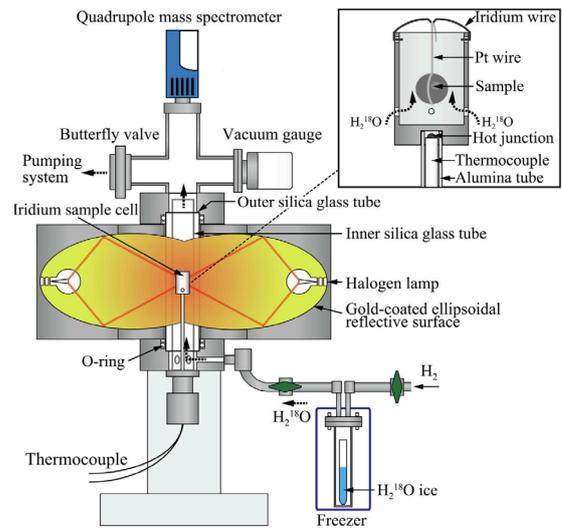


これまでに、隕石試料や探査機「はやぶさ」および「はやぶさ 2」の回収試料の分析や、日本に落下した隕石の鑑定などを行っています。はやぶさ 2 の探査した小惑星リュウグウの元天体（母天体）がどのような環境で誕生し、いつ地球に近づいてきたか、などがわかってきました（左図）。

この他にも、コンドライト隕石や小惑星ベスタや火星起源隕石の年代測定なども行っており、太陽系 の材料物質の起源、小惑星・惑星などの形成と進化過程の解明に向けた研究をすすめています。

(3) 宇宙環境を模擬した室内加熱実験

およそ 46 億年前の太陽系には、希薄なガスと固体物質ダストからなる“原始太陽系円盤”と呼ばれる段階が存在し、その中で起こった様々な化学反応を通じた惑星材料物質の形成・進化は、現在の太陽系の化学的多様性に反映されています。本研究室では、原始太陽系円盤で起こる様々な化学反応に注目し、太陽系固体模擬物質を用いて宇宙環境を模した環境下での加熱実験をおこない、隕石などの天然サンプルの分析結果から初期太陽系の情報を読み解く試みをしています。具体的には、初期太陽系円盤はガス圧や時には温度が低く、化学反応は熱力学的平衡に容易に到達しないことから、化学反応速度論を用いた解釈が必要となります。そのため、実験後のサンプルの化学的・組織的分析から反応速度を支配している化学反応プロセスの速度パラメータを取得し、隕石などの分析からだけでは見えてこなかった初期太陽系の環境を復元する試みをおこなっています。一例として太陽系で最初に作られた物質である難揮発性包有物 CAI の酸素同位体組成に注目した実験的研究の結果を示します。この研究では、熔融を経験しメルト状態から結晶化した CAI と円盤環境を模した低圧ガスとの酸素同位体交換実験をおこない(上図)、天然熔融 CAI の酸素同位体組成分析の結果を踏まえて、最高温度 (~1400°C) での加熱継続時間と円盤全圧 (~水素圧) を定量的に推定しました(下図)。



有機宇宙地球化学 宇宙・地球環境における有機物の存在と役割

スタッフ

教授

奈良岡 浩

准教授

山内 敬明

助教

北島 富美雄

宇宙において最も存在度の高い元素である水素、酸素、炭素、窒素などは地球生命の基本骨格をなす有機化合物を構成する元素です。星間空間から隕石・宇宙塵などの地球外物質にも有機分子は存在し、有機物からどのように生命が誕生したかは大きな謎です。また、誕生した生命の活動は地球表層環境を大きく変えてきました。例えば、光合成などによって作られた有機物が堆積物中に埋没することにより、大気には酸素が蓄積されました。一方、堆積物や様々な年代の堆積岩中には地球史における生命活動の記録が刻まれており、生物が作り出したバイオマーカーと呼ばれる有機分子化石が生命と地球環境の相互作用の謎解きをさせてくれます。

有機物は炭素の化学結合の多様性から、実に様々な化合物を形成します。また、その構成する炭素、水素、酸素、窒素は安定同位体 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, D/H, $^{18}\text{O}/^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) を持ち、それらの同位体比は起源 (source) と物理・化学および生物的過程 (process) により変動します。よって、自然界に存在する様々な有機物の構造と同位体組成を研究することにより、宇宙・地球環境における化合物の成り立ちや生命活動を解析することができ、さらに地球史における環境変遷なども知るすることができます。

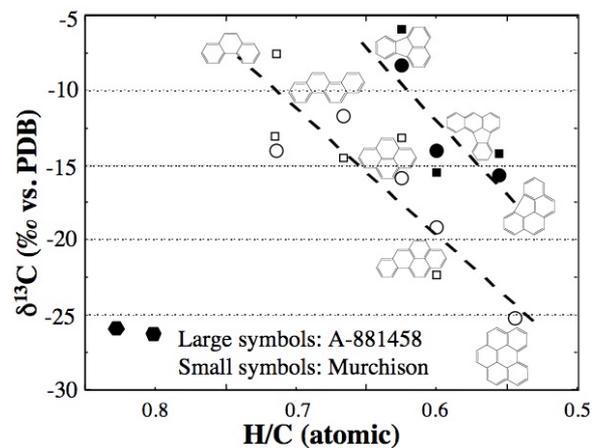


図1 炭素質隕石中の PAHs の炭素同位体比 (地球上では見られない値を持ち、2つの反応系列がある)

(1) 隕石中の有機化合物の起源と生成過程に関する研究

地球外物質で最大約 5% の有機物を含んでいる炭素質隕石があります。マーチソン炭素質隕石や南極産炭素質隕石にはアミノ酸やカルボン酸、多環芳香族炭化水素 (PAHs) などの有機化合物が検出され、その存在状態 (例えば、アミノ酸の左右構造の優位性) や安定同位体比を調べることで、有機物の起源や生成過程を明らかにします (図 1)。また、微小領域のラマンスペクトルや赤外吸収スペクトルなどの顕微分光の手法を用いることにより微小領域の炭素質物質の同定が可能となってきました (図 2)。

室内におけるシミュレーション実験を通して隕石母天体などで起こった反応や条件などの考察も行います。また、地球外物質に含まれる微量有機物の新たな分析法の開発も行っています。

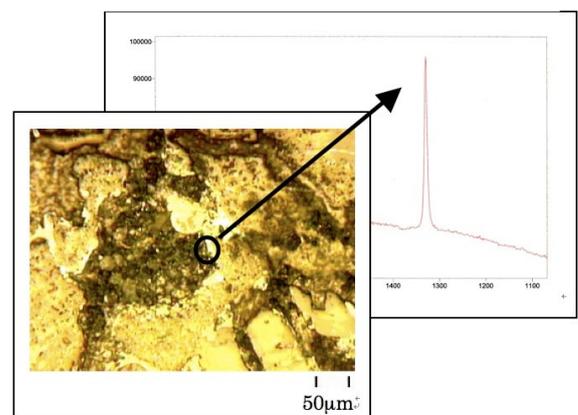


図2 Kenna 隕石 (ユレイライト) 中のダイヤモンドの顕微ラマンスペクトル

(2) 様々な年代の堆積物に含まれるバイオマーカーの分析と地球環境との関係

地球史の古い堆積岩から現在の海洋や湖沼の堆積物には生物種に特有な指標有機分子(バイオマーカー)が含まれています。特にステランやホパン(図3)はそれぞれ真核生物と真正細菌の活動を表す指標とされ、生物進化の年代を決めるためにも用いられています。バイオマーカーの安定同位体比は生物の代謝と強く結びついており、地球の古環境(温度や酸化還元状態など)の変遷や水圏における栄養塩などに関連した一次生産などについて教えてください。

また、統合国際深海掘削計画などによって採取した深海掘削堆積物を分析することによって、地球表層に匹敵すると言われる深層生物圏の研究や、ガスハイドレートと呼ばれる炭化水素ガスと水からなる氷が形成される際の微生物活動の研究も行っています。

(3) 古細菌の膜脂質の存在形態と地球環境との関連に関する研究

地球上の温泉や高塩分度などの極限環境にも様々な微生物活動があることがわかってきました。これらは古細菌と呼ばれる生物界をなしています。古細菌は原始生命との関係が深い微生物とされ、極限環境(熱や強い酸性、高い塩分濃度)に強い生体膜構造を持っています(図4)。

古細菌について、その姿を微生物側から研究する(代謝や極限耐性の研究)一方で、この膜由来の有機物でのフィールドでの探査と成分分析や、古細菌の生態、生理、そして地球上での活動状況を調べ、環境との関係を探ることを行っています。

(4) 化学進化と生命の起源に関わる実験的研究

地球史45億年の中で生命は38-35億年前の比較的早い時期に誕生したと考えられています。生物活動の痕跡をどのようにして評価かの分析・解析手法を開発することは重要なことです。また、地球初期におこった化学進化(図5)によって、生命誕生に必要な有機分子の片手構造(例えば、L-アミノ酸やD-糖)の構築や膜構造形成がいかに起こったかも研究します。

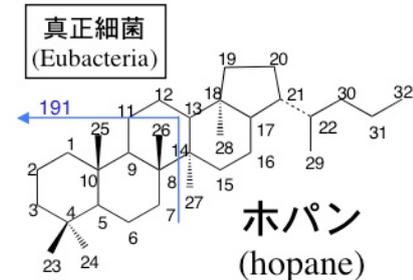
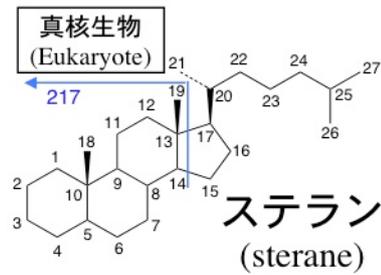
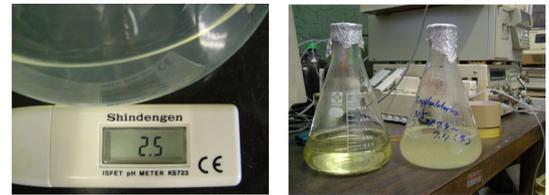


図3 真核生物と真正細菌にそれぞれ特有なステランとホパンの化学構造



生育至適pHは (左) 培地のみ 2~3! (右) 接種8日後

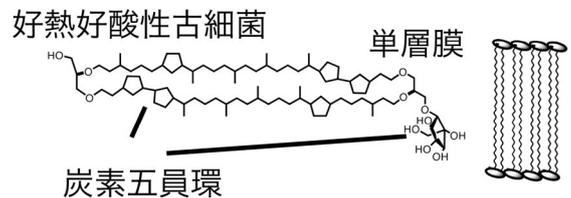


図4 好熱好酸性古細菌の培養と膜脂質

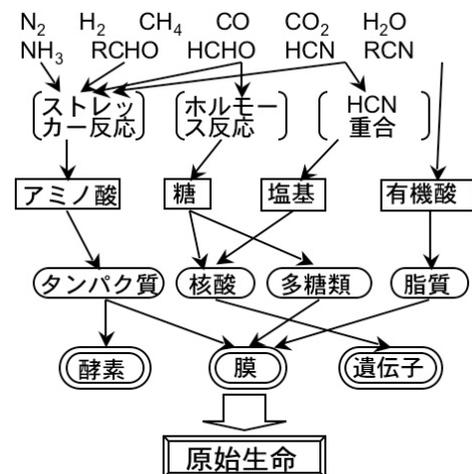


図5 生命誕生に至る化学進化仮説

地球システム化学 石ころを使って地球を四次元的に観る

スタッフ

教授

山本 順司

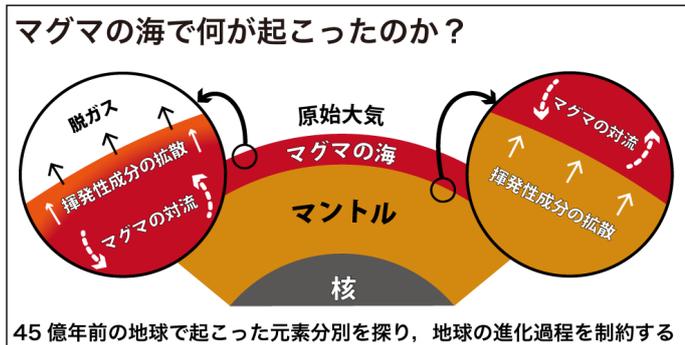
准教授

荒川 雅

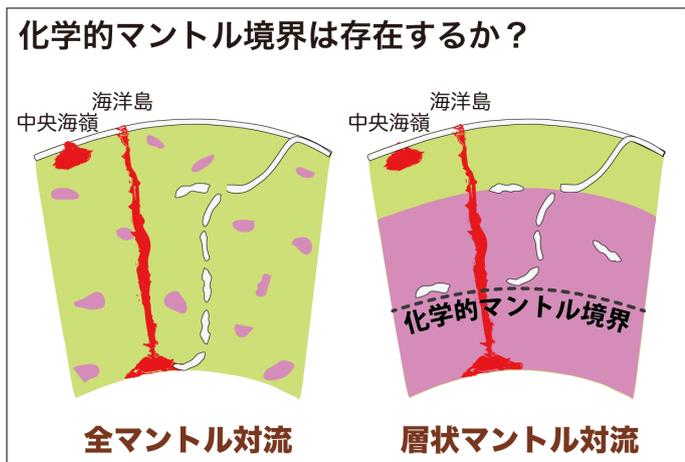
岩石を化学的に調べると、その形成年代や由来した深さがわかります。つまり、岩石には地球の四次元情報が詰まっています。当グループでは、その四次元情報に温度や同位体比、酸化還元条件など様々な軸を組み合わせることで、地球の進化を多様な時空間スケールで読み取る作業を続けています。

(1) 地球の誕生と進化過程を化学的に探る

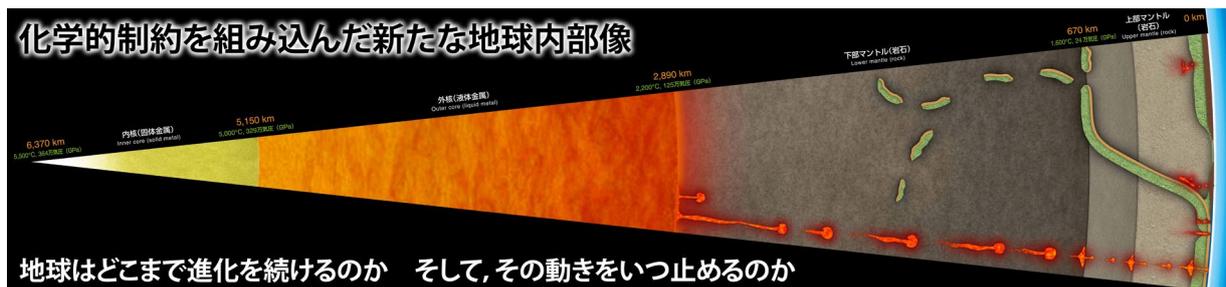
[冥王代の地球を探る] 地球の誕生時、地球表層にはマグマの海が存在したと考えられています。その痕跡は現在でも浅部マントルの化学組成に残っており、深部マントルや隕石の化学組成との比較から、マグマの海を介して起こった惑星表層の枯渇過程を探っています。



[マントルは化学的にも2つなのか] 地球深部から由来する溶岩の同位体組成から、化学的に見て少なくとも2つ以上のマントル成分が存在することが明らかになってきており、層状マントル対流モデルが再び脚光を浴びつつあります。当グループではもう一步踏み込んで、アルゴンのマスバランス計算から深さ約2000 kmに化学的境界が存在する可能性を提唱し、その妥当性や存在理由について探求を続けています。

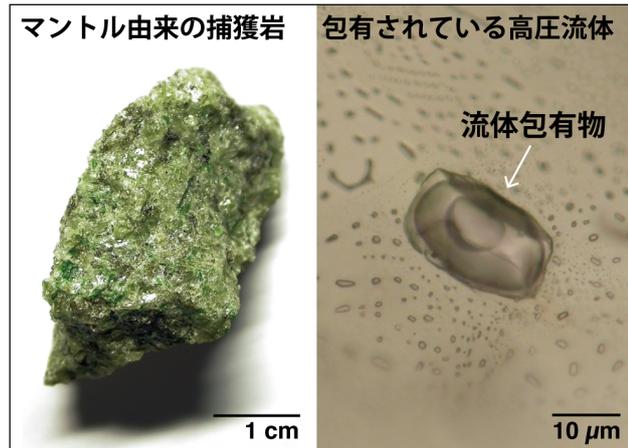


[地球の未来を見はるかす] 現在の地球内部は、地震波観測や高温高压実験などによってその解像度を高めつつあります。化学的情報はそこへ時間軸を提供できるため、過去の地球内部を探ることを可能にします。つまり、地球内部の進化を見せてくれます。太古と現在の地球を比較すれば、その延長線上にある私たちの未来が見えてくるでしょう。

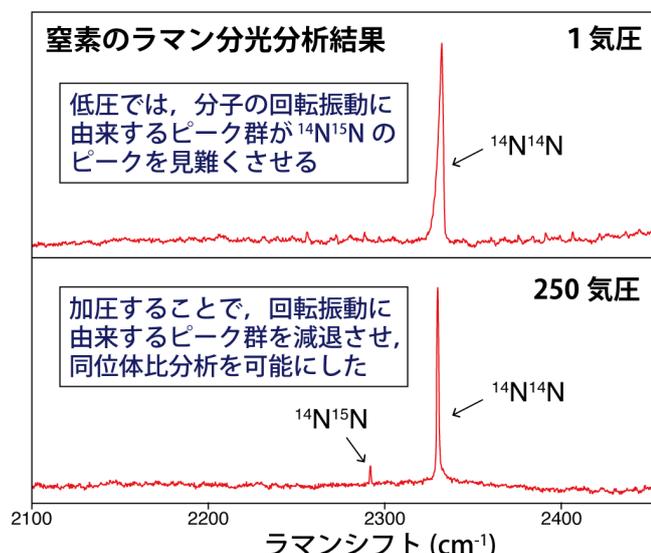


(2) 地球の内部を駆け巡る物質の正体をつきとめる

[超高精度地質圧力計の開発] 地球内部を循環する物質を探るには、地球内部の岩石を直接調べることが早道です。そのため、マグマが運び上げた地球内部のカケラ（捕獲岩）に注目しています。しかし、この岩石の由来深度を知らないと地球内部のどこを見ているのかわかりません。そこで捕獲岩を使える試料に転換するため、流体包有物の圧力を非破壊で分析する手法を開発しています。



[極小流体に特化した同位体分析法の開発] マンテル由来の岩石に包有されている流体は、地球の表層と内部をつなぐ循環系を担う物質です。この小さな包有物一つひとつの起源を探るため、極小流体の同位体比分析に特化した顕微ラマン分光分析装置の開発を進めています。これにより CO₂ 流体や N₂ 流体の炭素や窒素の同位体比を精度良く決めることが可能になってきました。この手法を流体包有物に適用すれば、地球内部の物質循環系が見えてくるでしょう。



[地球における新たなマグマ噴出場の探索] 地球には3種類のマグマ噴出場（中央海嶺・海洋島・島弧）が知られています。当グループでは、他にも2つのマグマ噴出場が存在することを見だし、そのマグマの起源や発生機構、地球の進化に対する影響を探っています。“第4のマグマ噴出場”は、島弧に沈み込む直前の海洋リソスフェア上にあり、プチスポットと名付けました。この溶岩の同位体比を測定したところ、これは、その存在が古くから予見されてきたLAB（リソスフェア-アセノスフェア境界）マグマであることがわかりました。“第5のマグマ噴出場”は大陸に存在します。ロシアや中国、モンゴルで採取した溶岩や捕獲岩から、沈み込んだ海洋リソスフェア由来の同位体シグナルを捉えつつあり、そのマグマ生成には大陸下に滞留する古い海洋リソスフェアが関与している可能性が見えてきました。このような多様なマグマ噴出場が地球の元素分別や冷却にどれほど影響を与えているのか探ることで、地球の将来を考えています。



高圧変形実験による地球惑星内部の動的現象の解明

スタッフ

教授
助教久保 友明
坪川 祐美子

地球深部の動的環境を再現してその場観察する

プレートテクトニクス型のマンテル対流は固体地球独自の極めて重要な現象です。化学的不均質をもって誕生した海洋プレートは、地球表層で冷却され含水化して地球内部に沈み込んでいきます(図1)。表層プレートの温度異常、化学異常が直接天体内部に持ち込まれている点がこの対流モードの大きな特徴で、深部プレートの動的挙動には未だ多くの興味深い謎が残されています。我々はその謎を解くために高圧変形実験装置(図2)を駆使し、地球深部の動的環境を再現して深部岩石の物性を明らかにする実験研究を行っています。人間よりも大きい装置に数 mm 程度の岩石試料を精密に組み込んで、地球下部マンテルまでの温度圧力を発生し変形実験を行います。この装置は放射光を導入できる点が大きな特徴で、高輝度で高エネルギーのX線を用いて、極限環境下の試料の相転移や破壊流動現象を直接その場観察できます。

プレートの沈み込み現象に関する実験研究

冷たくて硬い海洋プレートが沈み込み帯で変形しマンテル深部へと戻っていくためには、プレートの強度を著しく下げるためのメカニズムが必要です。天然におけるマンテル剪断集中帯では、細粒粒子(数十 μm ~サブ μm)に変形が集中し“弱層”が形成される様子が観察されています。これは細粒粒子が卓越する領域で、一般的な転位クリープではなく、粒径依存性を持つ変形メカニズム(岩石強度 \propto 粒径 $^{-2}$ or $^{-3}$)が支配的となり、周囲の岩石と比べ強度が2桁程度低くなるからです。つま

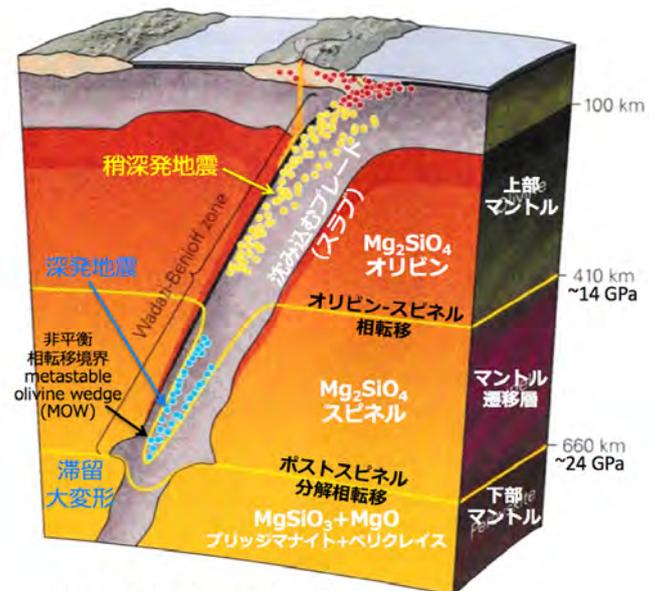


図1 地球深部に沈み込むプレート

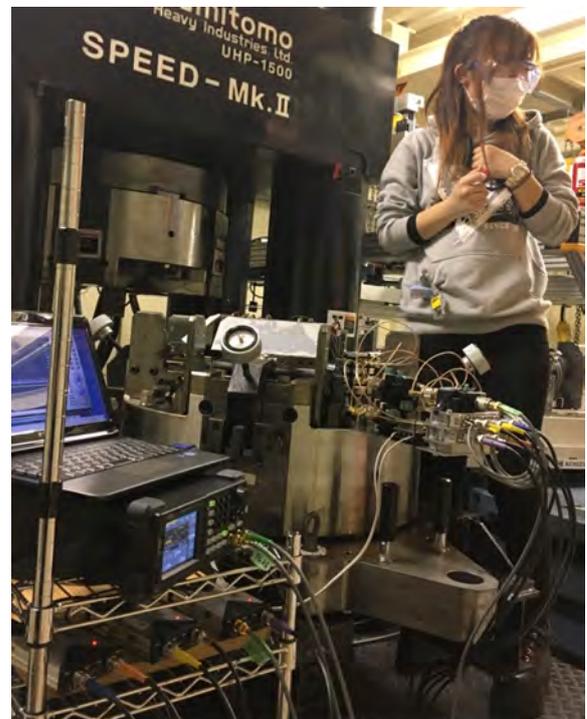


図2 地球深部の動的環境を再現してその場観察できる高圧変形実験装置

り、プレートの沈み込みといったダイナミックな現象には、ごく細粒な粒子の存在が関わっている可能性があります。剪断集中帯に匹敵する細粒の岩石組織を実験室で再現し（図3）、高压下での変形実験（図2）によりその強度を評価することで、プレートの沈み込みプロセスを微視的スケールから明らかにすることを目指しています。

深部プレートの軟化と深発地震に関する実験研究

沈み込んだ硬い地震性プレートは、地球深部で軟化して非地震性プレートへと変化していきます（図1）。そのプロセスには、上部マントルで起こる含水鉱物の脱水反応やマントル遷移層以深で起こる高压相転移が深く関わっています。図4は我々が最近開発している、放射光とマルチアンビル型高压変形装置、acoustic emission (AE) 測定装置を組み合わせた実験システムの一例です。図3のような深部岩石試料を図4の装置にセットして実験します。このような実験技術を用いて、下部マントルまでの深部岩石の相転移動力学と変形破壊挙動を直接的に実験研究し、90年以上も謎とされている深発地震や深部プレートの軟化プロセスの解明を目指しています。

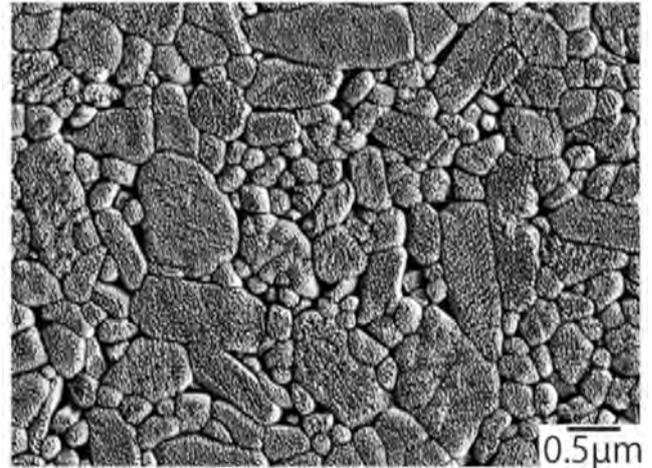


図3 プレート岩石を構成する輝石のサブミクロン多結晶体

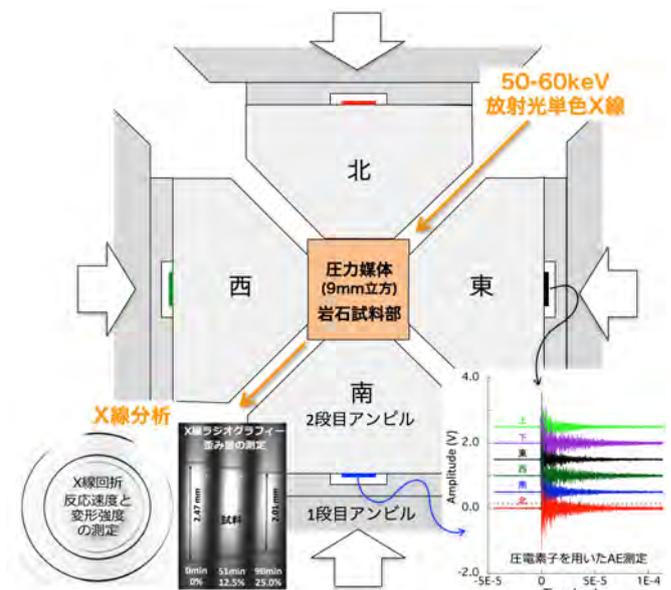


図4 放射光X線を使って高温高压下で岩石の相転移や変形破壊挙動をその場観察できる実験装置（図2の装置に組み込まれる）

比較惑星物質学への展開

地球深部の動的な物質科学を、氷天体や衝撃変成隕石に応用し、惑星氷のレオロジー（図5）や衝撃変成隕石で見られる非平衡相転移の実験研究を行っています。構成物質が変化することで地球とは異なる現象が引き起こされることがあります。このように惑星深部物質の相転移と流動現象を実験的に解明しながら、天体内部で起こる様々なダイナミック現象を解き明かす研究を行っています。

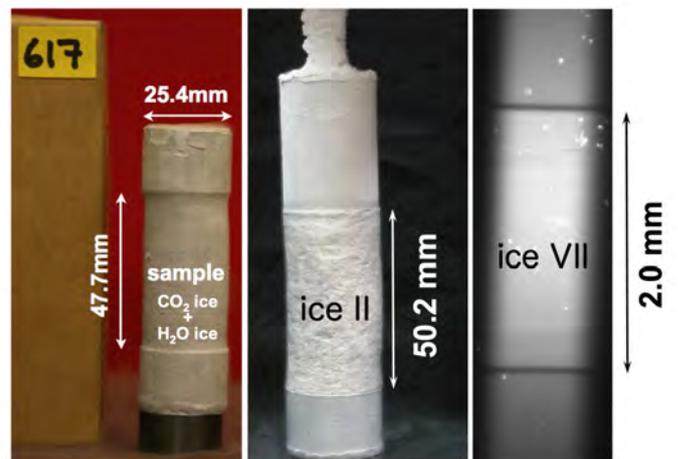


図5 惑星氷の高压下での変形実験

化石から地球の歴史と生物進化を探る

スタッフ 教授 伊藤 泰弘

太陽系は46億年の歴史を持っていますが、太陽系ができて数億年後には、すでに現在とほぼ同様の姿になっていたと考えられています。その中で地球上の生物には約30億年の歴史があり、私たちの身のまわりで普通に見る生物の祖先はおよそ6億年前までさかのぼることができます。本研究分野では、地球と生物の歴史を理解するために、おもに無脊椎動物を研究対象に、さまざまな地質時代の化石生物の形態進化や古生態について研究をしています。

（1）博物館が研究拠点

本研究分野は、総合研究博物館（箱崎サテライト）を研究拠点としてゼミや実験を行っています。博物館には、これまでに研究のために採集された多くの化石コレクションが保管されています。採集されたまま全く手つかずの化石や、研究されたものの再検討が必要な化石もあります。これらの化石標本は、箱崎の博物館の他、伊都キャンパスにある伊都標本資料研究・教育ブランチに収蔵されています。このような化石を収蔵する博物館は、実は古生物学研究にとってネタの宝庫です。まずはスタートアップとして、これらの化石を博物館標本として使えるように整備・データベース化することから研究を始めます。もちろん、化石が好きで自分自身で研究したいテーマがあれば、それを選んで研究することも可能性としてあります。



総合研究博物館（箱崎サテライト）



伊都標本資料研究・教育ブランチ

（2）古生物標本データベースの構築

現在、日本全国の大学・博物館・資料館等における古生物標本（特に古生物学の文献

に記載された証拠標本)の所蔵情報に関するネットワークを構築するプロジェクトを進めています。そのため、1)古生物デジタル標本の登録・保管・再利用システムの構築、2)九州大学の地質学・古生物学コレクションの標本整備(キュレーティング)とデジタルアーカイブ化に取り組み、総合研究博物館を拠点とした標本・資料情報の公開や利便性向上など、データベースの研究・開発に取り組んでいます。



標本のデジタルアーカイブ化



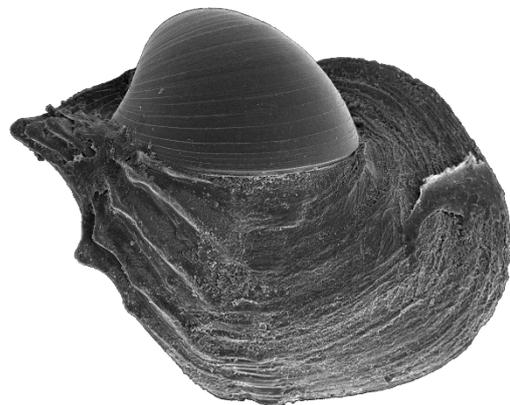
ジュラ系豊浦層群アンモナイト化石

(3) 穿孔性二枚貝類の機能形態と進化

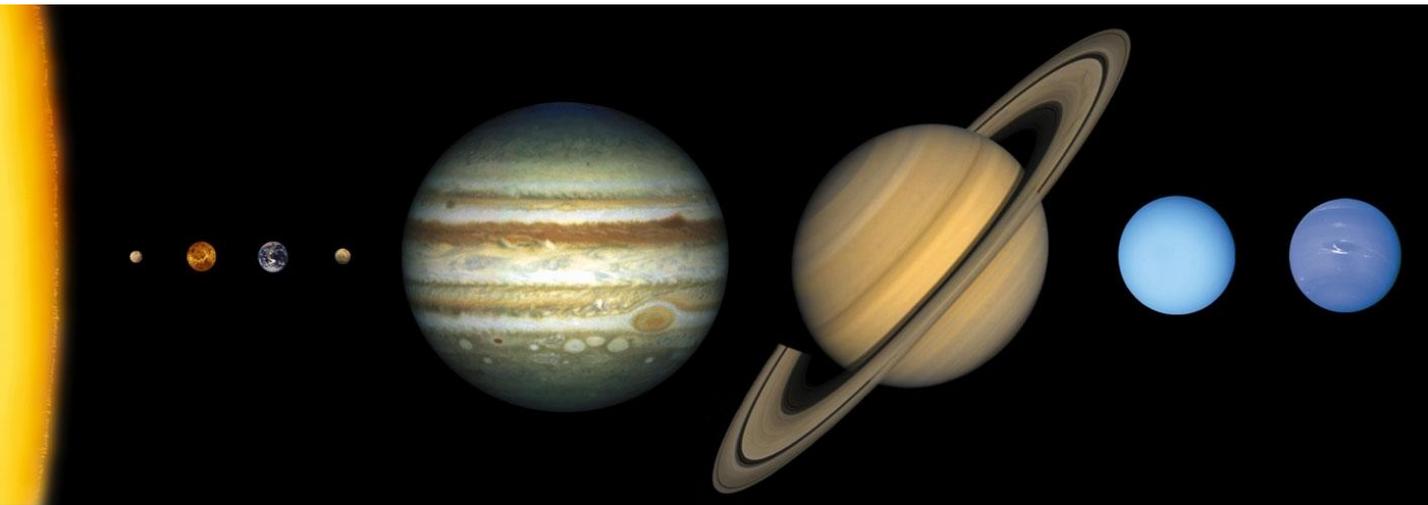
また個別の研究テーマとして、岩石・木材・サンゴなど、様々な硬さの基盤に穴を穿って生息する特異な穿孔性二枚貝ニオガイ上科に着目し、穿孔機能がどのように獲得され、多様化したのか、個体発生、機能形態、化石記録に具体的な手がかりを求めて研究をしています。



岩石に穿孔して生息する現生ニオガイ類



穿孔初期のニオガイ類の殻(約 500 μm)



<https://www.geo.kyushu-u.ac.jp/>