

新しい超高压変形実験装置による 地球中心核ダイナミクス解明への挑戦

ジュール・ヴェルヌのSF小説「地底旅行」にみられるように、地球の深部はどうなっているという疑問を、人類は永年にわたり心に抱いてきました。しかしそこは極めて高い圧力と温度が支配しており、文字通りのフロンティアで直接探査が不可能な領域です。例えば掘削による直接探査の世界記録は、ロシアのコラ半島での深さたった12kmです（地球の半径は約6400km）。高压地球科学では、このような「掘って直接観る」ことが不可能な世界を理解するため、中心で364万気圧、5000°Cにおよぶ地球深部の超高压高温極限環境を実験室に再現し、地球を構成している物質の様々な物理的・化学的特性を調べる研究が盛んに行われています。このような中で私は特に、地球誕生から46億年にわたる熱史や物質循環を支配する地球内部のレオロジー的性質を理解すべく、前人未到の地球中心圧力温度環境下での地球物質の変形実験実現に取り組んでいます。

謎に満ちた地球の深部

われわれが住む地球の地下深くはとてもダイナミックで、謎に満ちています。マントルは地質学的な時間スケールでは流体としてふるまい、地球深部の熱を地表へと逃がすために対流します。プレートは地表から深部へと沈み込みます。一方で、太平洋とアフリカ大陸の下では、マントルの底から数千キロメートル規模の上昇流が生じていると考えられています。ジュール・ヴェルヌのSF小説「地底旅行」にみられるように、このような地球深部の構造への知的好奇心を、人類は永年にわたり心に抱いてきました。また一方で地球内部の活動は、地球史を通じた地球表層環境の変動や深発地震など、さまざまな時間・空間スケールで人類の生活に影響を与えるため、その理解は人類の切実な要求でもあります。しかしながら地球深部は極めて高い圧力と温度



京都大学
人間・環境学研究所
特定准教授

野村 龍一
Ryuichi Nomura

地球科学

が支配しているため、文字通りのフロンティアで直接探査が不可能な領域です（図1）。例えば掘削による直接探査の世界記録は、ロシアのコラ半島での深さたった12 kmです。

一方で、地震波や電気伝導度、ニュートリノ、地質学的記録といった間接的観測手段は、我々に地球内部に関する様々な情報を与えてくれます。例えば地震波速度異方性と呼ばれる、地震波の伝播速度がその方向によって異なる現象は、地球内部の流動に伴う構成物質の変形と選択配向（多結晶体の結晶向きが揃うこと）で説明されると考えられています。これは鉱物種によっては結晶方位間で弾性波速度が異なるためです。どのような選択配向が地震波（弾性波）観測を説明できるのか、その選択配向はどのような変形、流動場で起きるのか、高压高温変形実験で明らかとなる力学データと比較することによって、さまざまな観測データを地球内部の活動の解明へとつなぐことができると考えられます。

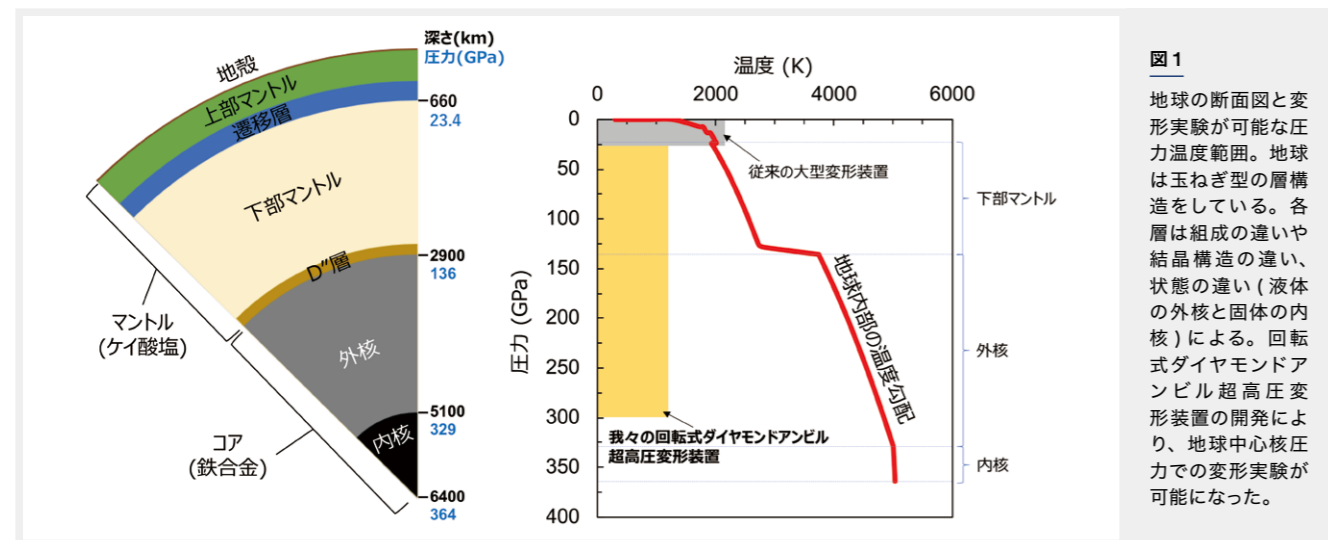


図1

地球の断面図と変形実験が可能な圧力温度範囲。地球は玉ねぎ型の層構造をしている。各層は組成の違いや結晶構造の違い、状態の違い（液体の外核と固体の内核）による。回転式ダイヤモンドアンビル超高压変形装置の開発により、地球中心核圧力での変形実験が可能になった。

実験室に地球をつくる

近年の高压地球科学における超高压高温発生技術と極限環境その場測定技術の進歩はめざましく、今ではダイヤモンドアンビル超高压装置を用いることで地球中心の圧力と温度を実験室に再現し、その結晶構造などを決定できるまでになっています。一方で、高压高温「プラスα」の実験技術を必要とする物質の流動特性（レオロジー、「動的」性質）については、その実験可能圧力範囲が既存の大型変形装置（例えば回転ドリッカマー装置やD-DIA装置）による約30 GPaまでに限られています（図1）。そこで私は、2016年よりダイヤモンドアンビル超高压装置をベースとし、変形実験用に改良した回転式ダイヤモンドアンビル超高压変形装置を開発・高度化し、より高压より高温での変形実験実現を目指した研究を行ってきました（図2、図3）。その結果、2017年にはマントル全域の圧力をカバーする135 GPaまで、2018年夏には300 GPaでの変形実験実現に成功しました。現在、地球中心圧力温度での変形実験実現を目指して更なる開発を進めています。

実験が与えてくれるもの

地球最深部のような極限環境では、観測、実験、理論すべてが困難でアプローチの方法が限られており、かつデータもロバストといえるものはあまりありません。そのため、実験室は常に新しい視点での実験手法を模索し、結果生まれた新しい開発技術は往々にして驚きに満ちた知見を私たちにもたらしてくれます。我々の開発技術は謎に包まれた地球最深部のダイナミクスを解き明かすことができるのか、それともさらなる謎を呼ぶのか、いずれにしても今からわくわくがとまりません。

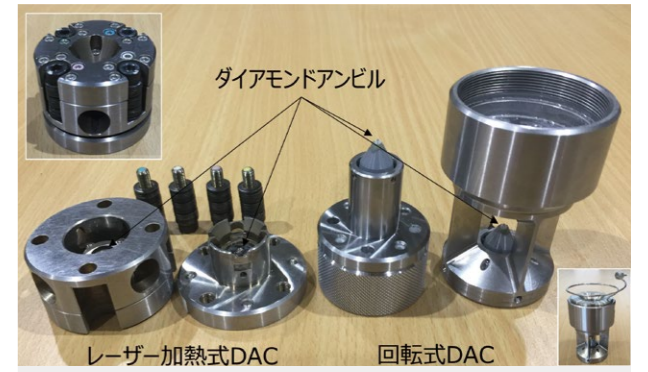


図2

様々なダイヤモンドアンビル装置 (DAC)

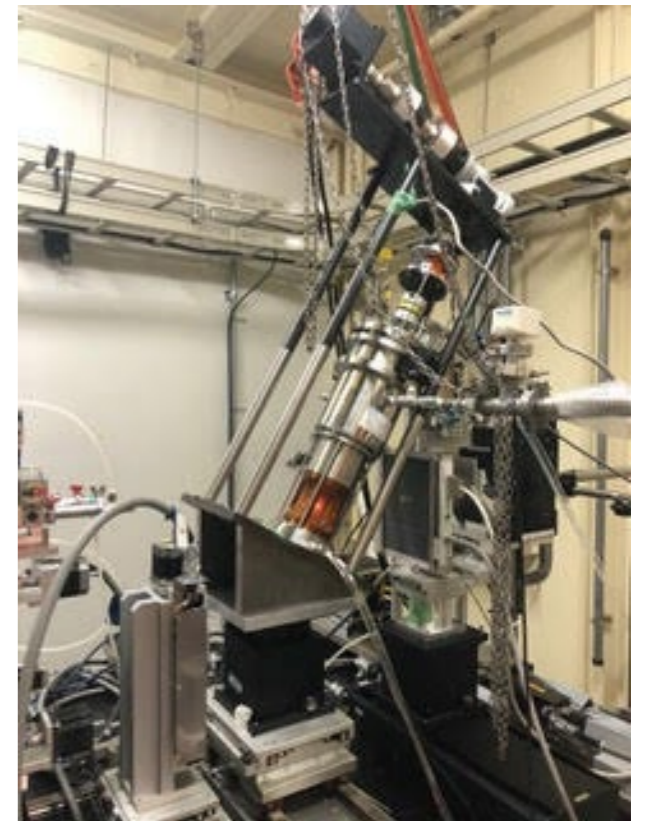


図3

大型放射光施設 SPring-8 における高压高温変形実験の様子

参考文献

- Ryuichi Nomura, Haruka Ozawa, Shigehiko Tateno, Kei Hirose, John Hernlund, Shunsuke Muto, Hirofumi Ishii, Nozomu Hiraoka (2011) Spin crossover and iron-rich silicate melt in the Earth's deep mantle, *Nature*, 473, 199-202. doi:10.1038/nature09940
- Ryuichi Nomura, Kei Hirose, Kentaro Uesugi, Yasuo Ohishi, Akira Tsuchiyama, Akira Miyake, Yuichiro Ueno (2014) Low core-mantle boundary temperature inferred from the solidus of pyrolite, *Science*, 343, 522-525. doi:10.1126/science.1248186
- Ryuichi Nomura, Shintaro Azuma, Kentaro Uesugi, Yuki Nakashima, Tetsuo Irifune, Toru Shinmei, Sho Kakizawa, Yohei Kojima, Hirokazu Kadobayashi (2017) High-pressure rotational deformation apparatus to 135 GPa, *Review of Scientific Instruments*, 88, 044501. doi:10.1063/1.4979562