

## 論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 ( 理 学 )	氏名	張 友君
学位授与の要件	学位規則第 4 条第①・2 項該当		
論文題目			
Shock Compression of Earth Materials and Implications for the Composition of the Earth's Deep Interior (地球物質の衝撃圧縮と地球深部の組成の推定に関する研究)			
論文審査担当者			
主 査	教 授	関根 利守	
審査委員	教 授	日高 洋	
審査委員	教 授	須田 直樹	
審査委員	教 授	片山 郁夫	
審査委員	准教授	佐藤 友子	
〔論文審査の要旨〕			
<p>地球深部を調べる方法としては、実際に試料の採取が絶望的な観点から、地震波の観測に基づく地震波速度の変化や密度変化と深部に相当する実験条件下での考えられる深部物質の音速と密度を決定し比較検討することが必要である。最近の研究結果によれば、地球マントル深部での水の存在によるマントル深部の物性変化や温度低下等と地球コアの軽元素の種類と量の違いによる地球コア温度との関係等様々な地球深部に関するモデルが提案されている。地球下部の条件を実現させる為に衝撃波を利用した密度決定と音速決定を行い、含水鉱物の蛇紋石と地球コア物質の鉄ニッケルシリコン系物質のそれぞれの挙動を調べることは、最近のモデルの検証に重要である。地球下部マントルでの水の挙動の理解は、マントルでの物質特性特に含水鉱物の安定性に深く関わる。地球外核中の軽元素の量は合計で約 8%と推定されるが、その種類は大きな議論となっている。そこで本論文においては、天然産で高品質な蛇紋石の一つであるアンチゴライトに関する実験で水が下部マントル条件でどんな相として安定でいられるかを検討すると同時に、液体状態にある外核中の軽元素として正確なデータが欠けているシリコンに注目し実験を行ない、シリコンの役割を明確にするため検討を行なった。以下に本研究成果の概略を記す。</p> <p>蛇紋石の一種であるアンチゴライト（化学組成は <math>Mg_3Si_2O_5(OH)_4</math> で代表される）について調べた。蛇紋石は沈み込み帯やマントルあるいは隕石中に存在している。アンチゴライトに関する挙動、安定不安定性、分解を調べる為に二段式軽ガス銃での衝撃圧縮実験を実施した。粒子速度の時間分解計測から約 130 GPa までのユゴニオを決定し、同時に衝撃圧縮下にあるアンチゴライトの音速を見積もった。その結果から 3つの領域に分かれ、43 GPa までのアンチゴライトとしての低圧相領域と 43 GPa 以上での短時間圧縮時の準安定低圧相領域と長時間圧縮時の高圧相領域が認められた。このように衝撃圧縮時間の相違で異なる動的挙動が明らかになった。ユゴニオ上での温度は計算によって求め、圧力-密度、圧力-音速、圧力-温度の関係からアンチゴライトの分解反応が準安定圧縮時に比べて体積増、音速の増大、温度の低下を伴うことを明らかにした。この反応の活性化エネルギーは大き</p>			

く、分解が遅い反応である。先行研究で研究された他の蛇紋石に関するユゴニオも考慮して、蛇紋石の高温高压下での分解生成物の推定を行なった所、最近発見された高密度含水マグネシウムケイ酸塩 H 相を含む生成物になることを明らかにした。このことは音速結果とも調和的である。このアンチゴライトに関する衝撃実験から蛇紋石の対衝突準安定性が地球の形成過程での水の運搬役として、また蛇紋石の高温高压分解生成物の安定性から地球下部マントル深部への水の運搬役として重要な役割を担うと言える。

地球コア中の軽元素に関しては、地球化学的見地から種々の軽元素が考えられ多くの研究が行なわれている。しかし、地球コア条件での正確なデータが欠けているため、決定的な議論になっていない。そこで本実験では、地球コア条件を実現できる衝撃圧縮法を使い、地球コア候補組成の状態方程式および音速データを取得した。これらのデータをコアに関する地震波データと直接比較し、コア中の軽元素の特定化と量の推定を試みた。使用したモデル組成は、先行研究結果を参考にして Fe-9Ni-10Si 合金とした。二段式軽ガス銃で高速衝突実験を行い、衝撃波速度と粒子速度の両者を同時測定することで、この合金に関するユゴニオを決定した。また粒子速度の時間変化の記録に基づき高温高压下での音速を 280 GPa まで決定した。その結果得られた圧力-密度関係と音速-密度関係を利用し、地震波観測結果に基づく密度-深さ（圧力）および音速（地震波速度）-深さ（圧力）のコアに関する関係と比較した。圧縮下での融解が 147 GPa 以上の圧力で検出された。この融解開始条件は、純鉄の場合の 225 GPa に比べて相当低圧で起きることが明らかになった。この融解開始温度は、熱力学的検討から算出され、この点を通る融解曲線をリンデマン則で近似した。この近似融解曲線は、90 GPa までの先行研究結果と調和的であることが明らかになった。実験条件はユゴニオ上での温度・圧力であるので、得られた密度-圧力および音速-圧力をコアの温度-圧力に沿って補正する必要がある。コアの温度分布は測定では決定できないので、147GPa での融解時の温度を断熱的に変化させたものを使用した。熱力学的な温度計算に基づき衝撃圧縮時の温度を求め、この値をコアの断熱温度分布に補正した密度と音速を算出し、それらとの比較を行なった。その結果、Fe-Ni-Si 系での結果だけでは、コアの密度と音速の両者を同時に十分に満足される組成は実現困難であった。先行研究での Fe-O 系や Fe-S 系の結果でも同時に満足する組成は困難であったが、先行研究の結果を加味して Fe-Ni-Si-S-O 系まで混合モデルを使い拡張した所、密度と音速の両者を同時に満足される組成として Fe-Ni に約 6 wt%Si、約 2wt%S、約 1wt%O を持つ組成なら十分可能であることが明らかになった。このことからコア内核と外核の境界での温度は 5200 K と推定され、鉄だけの場合より 600-1000 K 低温になる。このように本研究では、地球コア物質に関する衝撃圧縮実験によるユゴニオ測定での密度の変化と音速測定での融解の検出と地震学的なコアの密度と地震波速度とを直接コア状態での値で比較し、コア中の軽元素の種類と量の見積もりを行い、シリコンがコア中の主要な軽元素であることとコアの温度はこれまで考えられていたより 1000K 近く低温の可能性を示唆している。このことは地球の熱史やコア形成過程を考える上で重要な束縛条件を与える。

以上の通り、本論文は地球深部のマントル下部中の水の挙動の解明と地球外核中の軽元素の量と種類の特化からの内部温度や地球コア形成過程への束縛を与える。従って、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与されるに十分な資格があるものと認める。

#### 公表論文

1. Youjun Zhang, Toshimori Sekine, Hongliang He, Yin Yu, Fusheng Liu and Mingjian Zhang. Shock compression of Fe-Ni-Si system to 280 GPa: Implications for the composition of the Earth's outer core. *Geophysical Research Letters* **41**, 4554-4559 (2014).
2. Youjun Zhang, Toshimori Sekine, Yin Yu, Hongliang He, Chuanmin Meng, Fusheng Liu and Mingjian Zhang. Hugoniot and sound velocity of antigorite and evidence for sluggish decomposition. *Physics and Chemistry of Minerals* **41**, 313-322 (2014).
3. Youjun Zhang, Toshimori Sekine and Hongliang He. A new interpretation of decomposition products of serpentine under shock compression. *American Mineralogist* **99**, 2374-2377 (2014). (Selected as a notable article by *American Mineralogist*)

#### 参考文献

1. Y. Zhang, Y. Gu, X. Pei, J. Du, J. Yang, Y. Yu. On design of driving planar flyer by network detonation technique. *Explosion and Shock Waves*, 2012, **32**(5), 542-546 (in Chinese).