

論文審査結果の要旨

氏名 田川 翔

本論文は5章からなる。第1章はイントロダクション、第2章から第4章が本論文、第5章が論文中での結果を用いた議論である。

第1章では、地球核に存在する軽元素問題について先行研究を紹介し、地球化学的な知見や実験鉱物学における到達点をまとめている。地球核は純鉄から密度にして最大10%軽いですが、その原因である軽元素の種類は60年来の未解決問題となっている。直接的な試料が得られない核の化学組成を理解するには、地球深部条件下での高温・高圧実験が必要である。しかし、主要な軽元素候補の一つである水素を含む実験は、その技術的な難しさから、他の軽元素候補に比べ、先行研究が非常に限られていた。実験設定の工夫と分析手順を確立することで、高圧発生装置ダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用い、水素が地球核の主要な軽元素か検証することが、本研究の目的として掲げられている。

第2章では、地球核に存在する水素量の範囲を、液体鉄と液体シリケートの間での水素の分配から議論している。分配係数は、地球核ができた時点における化学反応から、核に存在する軽元素量の最小値を制約するのに役立つと期待される。核に水素が存在する場合、地球起源物質中の水や原始惑星系円盤の水素に起因すると考えられ、その量の制約は地球の形成過程の理解にも影響する。従来、水素は高圧下で親鉄性を示す元素であるとされてきたが、実験の温度・圧力範囲は限られていた。一方、金属中の水素量の定量に議論があるものの、水素は親石性であるという結果も近年報告されている。水素の分配を理解するには、高圧下その場での水素の振る舞いを明らかにし、定量手順を新たに構築する必要がある。本論文では、放射光XRDを用いた鉄中の水素量の測定とSIMSを用いたシリケート中の水素量の決定とを組み合わせることで、地球核形成条件を含む30–60 GPa、3100–4600 Kでの、液体鉄-液体シリケート間の水素の分配係数を求めることに成功した。高温・高圧下で試料を反応させると、水素が鉄に多く分配されることがXRD測定から観察された。また、シリケート部分のSIMS分析では、数十 μm 四方の微小な高圧実験試料から水の面分析、定量が可能になっており、本研究の新規性の一つとなっている。本研究で得られた分配係数とシングルコア形成モデルを比較すると、地球初期のマグマオーシャンに水が約700 ppm存在する場合、核の水素量は0.29 wt.%を超えることが示唆された。本研究では、地球核形成条件下における水素の分配係数を初めて報告し、地球形成期にもたらされうる多量の水・水素のリザーバーとしての核の重要性を強調している。

第3章では、高圧下におけるFe-FeH二成分系の相図を議論している。相図は、共融点の化学組成により、地球の液体外核における軽元素量の上限を与えうる。しかしながら、その実験温度・圧力領域は20 GPaまでに限られており、核の圧力下(135 GPa以上)でのFe-FeH

系の相図はわかっていなかった。本研究では、放射光とレーザー加熱式 DAC を用いた高温・高圧下その場 XRD 測定により、高温下で出現する結晶構造とその水素量、また、融点の温度に焦点をあて、最大 173 GPa までの Fe-FeH 系の相関係を明らかにしている。また、先行研究間で一致が取れていなかった水素量の見積もり手法についても、水素量を 1 に固定した圧縮実験から基準を決める工夫を行っている。本研究から、(1)Fe-FeH 系は共融点を二成分系の中央付近にもつ共晶型の相図を持つこと、(2)端成分である FeH は、少なくとも 60 GPa 以上の高温下で、鉄が *fcc* (面心立方格子) を取る構造になること、(3)端成分 *fcc* FeH の融点は高いこと、(4)共融点に対して水素量が少ない側は、鉄が *hcp* (六方最密充填構造) 構造となる FeH_x が安定であることが明らかになった。20 GPa 以上における、Fe-FeH_x 系の融点・相関係の制約は本研究を除き報告例が極めて少なく、研究手法と結果に新規性がある。内核・外核境界の圧力に比べ実験の最高到達圧力は低いものの、核条件下における Fe-FeH_x 系の振る舞いをより詳細に予想できるようになった。本研究の結果から、水素が核に多量に存在すれば内核は *hcp* 構造となり得ること、共融点の位置は密度から見積もられる外核の水素量の上限值に近く、1 wt.% まで水素が外核に存在しても重い内核を結晶化させうることが示唆された。

第 4 章では、前章で予想された *hcp* 構造をもつ Fe-Si-H 合金に対して、圧縮挙動を観察し、130 GPa での状態方程式を構築することで、Fe-Si-H、Fe-H 系が核の密度変化と矛盾しないことを確かめている。

最終章である第 5 章では、第 2~4 章で得られた結果と、先行研究における他の軽元素の結果を組み合わせ、核の水素量を制約、水素に富む場合の外核の化学組成を予想している。本研究から、水素は分配、相図、圧縮挙動の観点において、地球核の主要な軽元素として妥当であることが示唆された。核に存在しうる水の量は、現在の海洋の約 55 倍にも達し、地球形成時において大量の水、水素がもたらされた可能性を指摘している。最後に、本研究以降の展望として、中性子線回折実験等による水素の高圧下直接定量への期待や、内核の低い *V_s* といった検証課題などが議論されている。

本論文は、これまで実験的に困難とされていた鉄水素化物について、技術開発から取り組み、地球核の軽元素量の制約や地球の起源物質の決定等に貢献するものである。

なお、本論文の第 2 章は、坂本直哉、廣瀬敬、坂本尚義、大石泰生との、第 3 章は、太田健二、廣瀬敬、大石泰生との、第 4 章は太田健二、廣瀬敬、加藤千恵、大石泰生との共同研究の成果であるが、いずれも論文提出者が主体となって実験を進め、分析、議論を行ったものであり、論文提出者の寄与は十分であると判断する。

以上の理由により、田川 翔 氏に博士 (理学) の学位を授与できると認める。