

研究課題別評価

1. 研究課題名: 木星の海を地球に創る
2. 研究者氏名: 奥地 拓生
3. 研究のねらい:

3-1 研究課題要旨

10～50Mbarの圧力下にある木星型惑星の中心部には H_2O の巨大な海がある。 H_2O の構造は水素結合形成のため多様であり、20kbarまでの圧力下に十以上の分子性結晶相が存在する。Mbarの圧力下では分子間距離の短縮の結果、水素結合は対称化して分子内結合を置き換え、 H_2O はイオン性物質に変わる。この相転移は熱励起による陽子拡散を可能にする、つまり木星型惑星内部の H_2O は、電子ではなく陽子が電荷を運び新しい物質、速陽子伝導体の最有力候補である。

1Mbarを超える静水圧発生はダイヤモンドアンビルセル(DAC)により可能である。だがDAC試料の主観察手段であるX線回折法は、わずか1個の電子で H_2O の構造を支配する水素原子には無効である。本研究では水素に特に敏感であり、かつ流体の構造解析が可能な核磁気共鳴測定をDAC試料に対して行う方法を新しく開発し、超高压力下での H_2O の構造と動的性質をその場観察する。

3-2 具体的研究目標

本研究の目的は、このような惑星内部での液体 H_2O の状態と変革を捉えることにある。この目的の達成のために、高压容器に閉じ込められた試料について、水素結合、つまり陽子の化学結合状態を、圧力の関数として観測する手法が必要になる。

超高压力下での核磁気共鳴分光測定は、13GPaまでの圧力下、液体窒素温度から室温までの温度範囲で試みられている。しかしこれは H_2O のイオン性物質への相転移には未だ及ばない圧力である。さらに高压力、そして高温でもある惑星内部の条件下で核磁気共鳴分光測定を行うために、(1)圧力発生と、(2)高周波送受信の二つの実験技術について、それぞれ過去の例よりも優れた装置を製作し、これを組み合わせることによって研究の目的を達成したい。

4. 研究結果及び自己評価：

以下に、さきがけ研究期間の3年間に行った作業を(1)実験装置製作と(2)実験の成果に分けて具体的に述べる。研究者がさきがけ研究課題要旨において提案した内容の中心は装置開発である。よって本報告においても(1)を主体とする記述となることをご御了承頂ければ幸いである。



実験装置製作

製作した実験装置の目的、特徴、稼動状況、今後の展開を述べる。

4-1 チタン合金ディスク加圧型ダイヤモンドアンビルセル(DAC)

目的 強磁場中での静的圧力発生能力の更新、さらに高温の実験を可能にすること。また超伝導磁石のボア内に固定した状態で、手動で圧力調整が行えること。

特徴 非磁性高強度耐熱合金である Ti-6Al-4V 合金(高力チタン)を構造材とするため、従来の非磁性材料よりも高温で高荷重を達成できる。設計温度は最高 500 。超伝導磁石に設置した状態で手動により締結ボルトを操作し、発生圧力を調整できる。

状況 目標とした 10kN の一軸性荷重の達成が可能な設計および加工を、難削材である高力チタンに対して行うことができた。このため圧力発生時の荷重の摩擦・材料変形によるロスがなく、ディスクによる増圧機構を用いて手動で滑らかに加圧を行うことができる。常温の Re ガスケットに対して圧力発生試験を行った結果、中心部で 40GPa の圧力発生を確認した。

展開 次項の電気炉と組み合わせて、高温での圧力発生試験を行う。



4-2 加熱用電気炉

目的 DAC の加熱。液体ヘリウム温度のクライオスタットの内側で加熱を行うため、熱を外に漏らさないこと。

特徴 小型の無誘導型シース線ヒーターの外部をセラミック加工品で断熱し、その外側に温度制御した冷却水を循環させる。

状況 設計、製作、冷却水循環試験を終了。

展開 高温での圧力発生試験を行う。



4-3 観察用倒立型蛍光分光顕微鏡

目的 核磁気共鳴信号の長時間の安定な積算を可能にするために、DAC 試料の相、温度、圧力の時間変化をその場でモニターする。

特徴 対物レンズは 0.3 の開口数を維持しつつ、ダイヤモンド窓の収差補正機能と 30mm の作動距離を有するため、上記電気炉の外側に配置して試料の観察ができる。蛍光励起レーザーと CCD カメラは強磁場中では動作しないため、ボア外に配置する。このため対物-結像レンズ間距離を延長して結像が可能な設計とした。これらの光学素子は位置調整後にレール上に固定され、精密 XY ステージとラボジャッキにより、試料へのフォーカシングが出来る。長い鏡筒は振動に強く、構造材はすべて非磁性である。

状況 設計、製作、磁場中での動作試験を終了。

展開 強磁場中での高圧試料のラマン散乱測定など。



4-4 高周波送受信システム

目的 熱雑音電力以下の強度の核磁気共鳴信号の励起、増幅、検波。

特徴 携帯電話の発達により性能向上の著しい、マイクロ波帯域の増幅素子を用いた、高利得低雑音指数の受信部を持つ(総合ゲイン 160dB 雑音指数 2dB)。増幅・周波数変換時の電力反射、漏洩、空中電波の混信は可能な限り抑えられ、熱雑音をボルトレベルに増幅しても、増幅回路の飽和、妨害、発振を起こさない。パソコン上で制御を行い、また原則として汎用の電子部品から構成されるため、市販の核磁気共鳴分光計よりもはるかに安価であるが、本研究の目的に限ってはそれと同等以上の性能を持つ。

状況 研究目的の達成に必要なベースラインの安定性を確保した。
 現在も作業とともに S/N が向上している。中間周波数で 10kHz 程度の非常に狭い帯域幅を持つ Monolithic Crystal Filter(45MHz サンプル入手済)、PIN ダイオードを用いたアクティブ・デュプレクサなど、新たな素子を導入してさらに性能を向上させたい。また超伝導磁石の安定性に匹敵しうる 10^{-8} 精度の周波数源を導入し、一日以上の積算を実現したい。

展開 細胞内物質輸送を磁気共鳴イメージングによって捉えようという microcoil 法への応用など。

4-5 耐荷重ステージ付き透過微分干渉顕微鏡

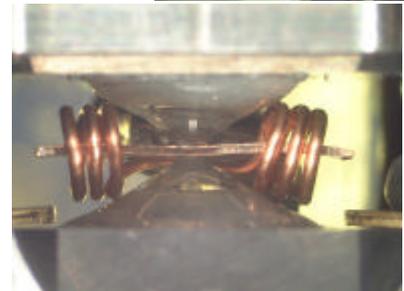
目的 超高压力下での H₂O の融解温度(融解曲線)の測定。
特徴 透過微分干渉法を用いてコントラストを増強し、良く見えなかった氷の融解に伴う微小な屈折率変化を捉える。
状況 圧力 10GPa、温度 400 までの範囲で氷の融解を観察した。
展開 低コントラスト試料の高温高压下での結晶成長の観察など。



実験の成果

(1) 信号検出

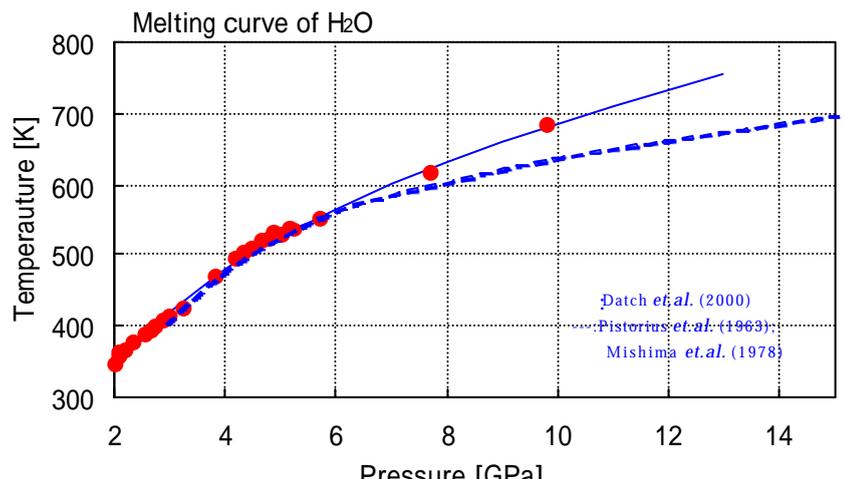
内径 2mm のヘルムホルツ型 RF コイルの間に配置され、キユレット径 600 μm の対向型ダイヤモンドアンビルによって加圧された直径 300 μm × 高さ 150 μm、圧力 1GPa の H₂O 試料からの信号検出に成功した。約 1 万回の積算を行った結果、核磁気共鳴信号検出の証拠となるスピネコーを捉えること



ができた。常温では H₂O はこの圧力で固体になる。よってこれ以上の高压下での信号取得のためには、氷を融解させるために加熱を行う必要がある。

(2) 氷の融解曲線測定

圧力 10GPa までの H₂O の



融解曲線を、透過微分干渉法を用いて顕微鏡下で測定した。この問題はほぼ解決されたと考えられていたが、昨年になって従来よりも高温の結果が報告された。今回はこれを裏付ける結果が得られた。

(1)氷のイオン性物質への相転移に伴う融解曲線の折れ曲がり、(2)プレートテクトニクスによって地球内部に運ばれる海水がいったん氷となり、マントル内で再び融解して、深発地震の発生源となる可能性などの問題を解く手がかりの得られた結果である。

この研究の高圧討論会(日本高圧力学会年会)への発表時の予稿を、成果として本報告に添付する。

自己評価と今後の展開

以上が、さきがけ研究の3年間に行うことが出来た作業である。明らかにこの研究は、未だ途上であるが、現時点での成果としては、核磁気共鳴分光による物性測定の範囲を超高圧力、そして高温へとさらに拡大して行く道筋はつけることが出来たと考えている。しかし測定結果を出し、論文を世に問うところまで仕事を進めることが出来なかったのも事実である。

3年の研究期間の間、天井が高く、超伝導磁石を置いても他所に迷惑をかけない実験室を探し、掃除するところから始めて、今日までほほ息をつく暇が無い状況であった。領域会議を除いて学会にもあまり行かず、使える時間を注いできた。個人商店の限界を感じたことも事実だが、一個一個手作りをしてきたことで、遙かに霞んでいた道のりを進むために必要な装置をほぼ完成させ、目標の見える位置までやって来ることができた。

今後の展開は、これらの装置の調整、試験、そして本測定である。残されたハードルとしては加熱実験の実施があるが、設計上は十分な余裕があり、これまでに遭遇してきた問題点よりは解決しやすいと考えている。今後も提案時の内容を実現するか、または駄目だとはっきりさせるまでは、今までのペースをできるだけ守りながら、作業を続けていきたい。

5. 領域総括の見解

「木星の海を地球に創る」という意表を突く研究課題が、提案審査の段階で多くの議論を呼び起した。表題は別にしても、高圧物性の中でも水素結合を有する水の超高圧構造は、惑星科学での関心事であるばかりでなく地球上の生命体にとっても、身近で重要な物質である水の物性を解明するというロマンがある。実行可能な枠内での綿密な研究を手堅く実行する傾向が目立つわが国の若手研究者の中で、実現可能性が未知な高度の実験技術のハードルに敢えて挑むと言う意欲が最終的に評価されて、異色な研究ながら本研究領域第2期の研究者の一人として採択された。その後の3年間の研究期間にわたる努力と工夫の結果は領域研究会の都度に報告され、アドバイザーや他研究者から好意的批判や助言が寄せられた。最終段階では、10GPa、700Kまでの水の融解曲線の顕微分光測定に成功したが、当初の目標とされた超高圧、高温が実現されるにはまだ至っていない。

“遙かに霞んでいた地点から、ようやく目標の見える位置まで来た”(本人の言葉)と言う現状である。この“さきがけ”研究を足場として、残る難関の克服を期待したい。

6. 主な論文等

- 1) Y. Abe, E. Ohtani, T. Okuchi, K. Righter and M. Drake, in Origin of the Earth and Moon, R. M. Canup and K. Righter, eds, Univ. of Arizona Press, 413-433 (2000).
- 2) 奥地拓生、サイアス、朝日新聞社、1999年12月号.
- 3) 奥地拓生、地球化学、33、247-254 (1999).
- 4) T. Okuchi, Journal of Physics: Cond. Matt., 10, 11595-11598, 1998
- 5) T. Okuchi, EOS Transactions, 79, F70, 1998.

期間中の研究発表

- 1) 奥地拓生、栗田典明、高圧討論会、神戸ファッションマート、2001.11.20、1A14.
- 2) 奥地拓生、栗田典明、惑星科学会、岡山理科大学、2001.10.6、206.
- 3) 奥地拓生、栗田典明、地球惑星科学関連学会合同大会、国立オリンピック記念青少年総合センター、2001.6.5、Mm-012.
- 4) 奥地拓生、小林直樹、地球惑星科学関連学会合同大会、国立オリンピック記念青少年総合センター、2000.6.28、Pe-017.
- 5) 奥地拓生、阿部豊、岩森光、地球惑星科学関連学会合同大会、国立オリンピック記念青少年総合センター、1999.6.10、Aw-006.
- 6) 奥地拓生、地球惑星科学関連学会合同大会、国立オリンピック記念青少年総合センター、1999.6.9、Ae-007.
- 7) Takuo Okuchi, American Geophysical Union, San Francisco, 2 Dec 1998.
- 8) Takuo Okuchi, Yutaka Abe and Hikaru Iwamori,, “ Origin of the Earth and Moon ” Conference, Monteley, California, 9 Dec 1998.