2024年度岡山大学 惑星物質研究所 共同利用·共同研究 成果報告書

提出日:2025年5月29日

共同利用研究の種類:□国際共同研究 ☑一般共同研究 □設備共同利用 □ワークショップ 課題名: <u>GHz-DAC 音速測定法による水溶液および高圧氷の高圧下音速測定</u>

共同研究員氏名: 松井 亮介

所属・職名: 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

分担者氏名: 下記リスト参照

分担者所属・職名: 下記リスト参照

	氏名		所属機関	職 名 また は 学 年	E-mail					
1	E	松井 亮介	大阪大学大学院理学研究科	M2	rskmatsui@ess.sci.osaka-u.ac.jp					
	Eng	Ryosuke	Graduate School of							
		Matsui	Science,							
			Osaka University							
2	H	米田 明	大阪大学大学院理学研究科	招 聘 研 究	yoneda@okayama-u.ac.jp					
	Eng	Akira	Graduate School of	員						
		Yoneda	Science							
		ronouu	0010100,							
		lonouu	Osaka University							
3	E	山崎大輔	Osaka University 岡山大学惑星物質研究所	教授	dy@misasa.okayama-u.ac.jp					
3	日 Eng	山崎 大輔 Daisuke	Osaka University 岡山大学惑星物質研究所 Institute for	教授	dy@misasa.okayama-u.ac.jp					
3	日 Eng	山崎 大輔 Daisuke Yamazaki	Osaka University 岡山大学惑星物質研究所 Institute for Planetary	教授	dy@misasa.okayama-u.ac.jp					
3	日 Eng	山崎 大輔 Daisuke Yamazaki	Osaka University 岡山大学惑星物質研究所 Institute for Planetary Materials,	教授	dy@misasa.okayama-u.ac.jp					
3	日 Eng 日	山崎 大輔 Daisuke Yamazaki 近藤 忠	Osaka University 岡山大学惑星物質研究所 Institute for Planetary Materials, 大阪大学理学研究科	教授教授	dy@misasa.okayama-u.ac.jp tdskondo@ess.sci.osaka-u.ac.jp					
3	日 Eng 日 Eng	山崎 大輔 Daisuke Yamazaki 近藤 忠 Tadashi	Osaka University 岡山大学惑星物質研究所 Institute for Planetary Materials, 大阪大学理学研究科 Graduate School of	教授教授	dy@misasa.okayama-u.ac.jp tdskondo@ess.sci.osaka-u.ac.jp					
3	日 Eng 日 Eng	山崎 大輔 Daisuke Yamazaki 近藤 忠 Tadashi Kondo	Osaka University 岡山大学惑星物質研究所 Institute for Planetary Materials, 大阪大学理学研究科 Graduate School of Science, Osaka	教授教授	dy@misasa.okayama-u.ac.jp tdskondo@ess.sci.osaka-u.ac.jp					

分担者リスト

5	E	増野 いづ み	岡山大惑星研	助教	izumi.mashino@okayama-u.ac.jp
	Eng	Izumi Mashino	IPM, Okayama Univ.		
6	E	石田 涼真	大阪大学大学院理学研究科	M1	ishidaryoma@ess.sci.osaka-u.ac.jp
	Eng	Ryoma	Graduate School of		
		Ishida	Science,		
			Osaka University		

研究報告・ワークショップ実施報告:

【1.1 研究目的】

地球の内部構造は地震波速度構造として調べられており、またその他太陽系天体 についても同様の地震波による探査が実施・想定されている。そのため、地球構成 物質やその他対象となる天体の構成物質に対する高圧条件下での弾性波速度(音 速)データの取得は重要であり、そういった圧力条件下での音速データの取得を GHz-DAC音速測定法(【1.2方法】にて後述)により目指すのが本研究の目的であ る。本研究においては、氷天体と呼ばれる天体(エウロパ、ガニメデ等)と、地球 を対象としている。

氷天体に関しては、内部海をもつようなエウロパ、ガニメデ、タイタンなどについて、その内部海の成分として考えられているような塩水系(MgSO4水溶液やNaCl水溶液など)に着目する。氷天体内部の圧力範囲(数百MPa~数GPa)におけるこれら塩水系の弾性波速度測定をGHz-DAC音速測定法により行うことを目的としており、これらの観測データは将来的な氷衛星の地下探査計画において重要な基本情報になると考えられる。また、圧力下の液体を対象とした音速測定は前例が限られており、実験室で測定が可能な圧力下液体相の音速手法開発としても重要性が高いものとなっている。

地球に関しては、その中でも下部マントル構成鉱物の1つとしてフェロペリクレ ース(Mg, Fe)O に着目する。フェロペリクレースは下部マントルに2番目に多く存 在する鉱物で、下部マントルの中下部領域の圧力(40~60 GPa)で含まれる鉄(Fe²⁺) が高スピンから低スピン状態へとスピン転移を起こす(Schifferle & Lobanov, 2022)。また、これら2つのスピンが混合した状態のフェロペリクレースの物理特性 は、高スピン、低スピン状態とは異なるため、混合スピン状態におけるフェロペリ クレースの弾性特性への影響は地震観測値の解釈に影響を与えると考えられる

(Kennett, 2021; Shephard et al., 2021)。加えて、音速測定によるスピン転移の検出は ブリルアン散乱法やX線日弾性散乱法を用いた実験で行われているが、先行研究の 中でも相違点がある(Méndez et al., 2022; Antonangeli et al., 2011; Crowhurst et al., 2008; Yang et al., 2015)。そこで我々はGHz-DAC音速測定法を用いてフェロペリクレ ースのVpとVsを測定し、弾性異常の検出とその影響の再検討を目指す。これによ り、地球の下部マントル領域の地震波観測における低速度領域などの特徴的な領域 の説明につながると考えられる。 【1.2 方法】

上記のような高圧下音速測定にはGHz-DAC音速測定法を用いる。このGHz-DAC 音速測定法は、音速測定手法の1つであるGHz法と高圧発生装置のダイヤモンドアン ビルセル (DAC:図1-1)を組み合わせた試料中の弾性波速度測定手法である。

圧電素子により発振したGHz帯の弾性波をDAC内の試料へ入射し、試料上面と試料背面でそれぞれ反射された弾性波の時間差(トラベルタイム)を測定する(図1-2)。DACで加圧された試料の厚みは10µmオーダーであり、そのような薄い試料中に最低でも1波長以上の波を入射・反射させる必要があるため、GHz帯のような高周波の弾性波を用いる。また、トラベルタイム測定の際には図2に示すようなS1,S2の弾性波が干渉した形で確認されるため、周波数を変化させながら2つの弾性波の干渉部分の強度変化を測定し、両者の関係(図2-4)からトラベルタイムを導出する。

また、試料長に対してはダイヤルゲージによる測定(図1-3)を行う。また、ダイ ヤモンドアンビルの弾性変形の考慮が求められるような高圧領域においては有限要 素法による補正を加えるが、この補正については今年度は私でなく共同研究者の学 生が扱った。

このようにトラベルタイムと試料長を測定することで弾性波速度を測定している。



左から図1-1、1-2、1-3

- 図1-1:ダイヤモンドアンビルセル(DAC)の模式図
- 図1-2:トラベルタイム測定の模式図。圧電素子により発振したGHz帯の弾性波を "BR"、

試料上面での反射波を "S1"、試料背面での反射波を "S2" として示した
図1-3: 試料長測定の模式図。アンビルの高さ(t_{ud}, t_{ld})をアンビル組み立て前に測定し、圧力印加中の全体長(t_{bd})を測定することで、t_s = t_{bd} − (t_{ud} + t_{ld}) によ

り圧力印加中の試料長(t_e)を求める。

【1.3 研究成果】

①氷VI相の音速データ(P波)取得

これまでGHz-DAC音速測定法においては液体試料および氷のような弾性の小さな 試料に対しての測定が行われていなかったため、塩水およびその高圧固体相の測定 の前に、まずは純粋なH₂Oの高圧固体相(氷VI相:室温~1.2GPa,および1.5GPaの条 件下)に対しての音速測定を行った。昨年度は干渉法を用いずに音速測定を実施し たが、測定に際する誤差の大きさ/測定値の信頼度に問題があった。今年度は干渉法 による測定を行うことでより誤差の少ない(~2%)測定結果の取得に成功した。ま た、発信器から出力する弾性波をある一定の間隔で2度発信させることで、単一の 弾性波では干渉が実現しないような試料厚みが大きな試料(~190µm)に対しての 干渉法によるトラベルタイムの測定を実現した。



左から順に図2-1、2-2、2-3

- 図2-1:試料写真。ガスケット穴径300µm、上が圧力~1.2 GPa、下が~1.5 GPaの氷VI 相。試料室内に見られる小さな粒は圧力測定のためのルビー粒
- 図2-2:観測される弾性波のシグナルの様子。橙色がS1、緑色がS1'(発振器で出力し た弾性波のうち2度目の波における試料上面反射波)とS2が干渉していると想 定される範囲。周波数の変化と共に干渉領域(緑色の範囲)の強度変化が確認 できる。
- 図2-3:周波数の変化と干渉部分の強度変化の関係を示したもの。上が~1.2 GPaでの 測定時の結果で、下が~1.5 GPaでの結果。



左から順に図2-4、2-5

図2-4:トラベルタイムTと、図2-3における隣り合う極値をとる周波数をそれぞれ f_n 、 f_{n+1} としたときの関係式 T=1/($f_{n+1} - f_n$)を用いて、~1.2 GPa、~1.5 GPaで のトラベルタイムをそれぞれ T=89.82±0.15 sec、80.34±0.18 secと導出し た。

図2-5:図1-3の手法で試料長を求め、図2-4にて導出したトラベルタイムを用いて弾

性波速度Vp を導出し、緑色と橙色でプロットした。ここではバッファーロッドをアンビルに押し付ける際の加重を考慮し、各測定において取りうる圧力の最大、最小の値をそれぞれ緑色と橙色で示した。また、GHz-DAC音速測定法以外の手法による音速測定を行った先行研究(Wang et al (2013))の値も青色でプロットし、調和的な結果を得られた。 数値としては Vp (at ~1.2 GPa) = 4.33(±0.02) km/s、Vp (at ~1.5 GPa) = 4.76 (±0.06) km/s

②フェロペリクレース試料のトラベルタイム(P波)取得

増野いづみ助教(岡山大学惑星物質学研究所)のご協力のもと、~66 GPaのフェ ロペリクレース試料(Mg0.83, Fe0.17)Oを作成した。また、試料部を反射する弾性波につ いて、ガスケットに由来する成分を極力排除するために、アンビルのキュレット径 (~ Φ 250 µm)に近づけた穴径のガスケット(Re: Φ ~205µm)を用いた。この試料に対 し、P波速度のトラベルタイム測定を行った。その結果は以下の通りである。



左から順に図3-1、3-2

- 図3-1:加圧前のフェロペリクレース試料の写真。ガスケットの穴径をキュレット径 に近づけてセッティングした。
- 図3-2:周波数を変化させた際の干渉領域の強度変化の様子。緑、赤色の範囲がそれぞ れ試料上面反射波と試料背面反射波。



左から順に図3-3、3-4

- 図3-3:周波数の変化と干渉部分の強度変化の関係を示した図。トラベルタイムの導出には赤で囲んだ範囲の極値を採用した。
- 図3-4:図3-3より、トラベルタイムは10.91(±0.30) nsecと導出された。