



## 火星コア物質の音速測定に成功

～火星コアの組成と火星の起源解明に向けて～

### 1. 発表者：

- 西田 圭佑（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 助教（研究当時）／  
現・バイロイト大学バイエルン地球科学研究所 研究員）
- 柴崎 祐樹（東北大学学際科学フロンティア研究所 助教（研究当時）／  
現・高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 特別助教）
- 寺崎 英紀（大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 准教授（研究当時）／  
現・岡山大学大学院自然科学研究科地球生命物質科学専攻 教授）
- 肥後 祐司（高輝度光科学研究センター放射光利用研究基盤センター  
回折・散乱推進室 主幹研究員）
- 鈴木 昭夫（東北大学大学院理学研究科地学専攻 准教授）
- 船守 展正（高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 教授）
- 廣瀬 敬（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 教授／  
東京工業大学地球生命研究所 所長・教授）

### 2. 発表のポイント

- ◆日本が世界に誇る川井型マルチアンビルプレス（注1）を用いた高圧発生技術、SPring-8（注2）/JASRI および高エネルギー加速器研究機構（KEK）フォトンファクトリー（PF）（注3）の放射光X線により、火星コア（注4）の最上部に相当する20万気圧2000度という高圧高温の極限条件下で、液体鉄-硫黄合金の音速（地震波速度）の精密測定に世界で初めて成功しました。
- ◆従来、火星由来とされる隕石の化学組成から、火星コアは鉄-硫黄合金で出来ていると考えられてきました。現在稼働中のNASAの火星探査機「インサイト（注5）」によって、火星コアの地震波速度が測定され、それが本研究で得られた音速と一致すれば、その仮説を実証できます。
- ◆一方、一致しない場合は、火星の起源を考え直す必要があります。地球のように、原始火星にも微惑星の衝突があったとすれば、コアには別の不純物が含まれている可能性もあります。火星の衛星フォボス・ダイモスの巨体衝突起源説の検証を目的の1つとしている、JAXAの火星衛星探査計画MMXとも関連があります。

### 3. 発表概要：

西田圭佑（研究当時：東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻助教、現：バイロイト大バイエルン地球科学研究所研究員）を中心とした、東京大学・東北大学・大阪大学・東京工業大学・KEK・SPring-8/JASRIの共同研究チームは、大型放射光施設SPring-8および放射光実験施設フォトンファクトリー（PF）を利用して、火星コアの主要構成物と考えられている液

体鉄-硫黄合金の音速を、火星コアの環境に相当する 20 万気圧 2000 度という高圧高温の極限条件下で精密に測定することに成功しました。

従来、地球物理学的観測や火星隕石の研究から、火星には液体鉄-硫黄合金でできたコアの存在が示唆されてきました。しかし、これまで内部探査が行われてこなかったため、火星内部の構造や化学組成に関しては未だよくわかっていません。現在、NASA による火星内部探査機インサイトが設置した地震計による内部構造探査が進行中で、すでに火震（火星の地震）を観測しています。火星コアを通る地震波を観測することができれば、その地震波速度を知ることができます。

そのような観測に先んじて、本研究グループは、火星コア物質とされている液体鉄-硫黄合金の音速（地震波速度）を実験室で測定することに成功しました。川井型マルチアンビルを使った高圧実験は、日本が世界をリードする研究手法で、これまでも地球や惑星深部の多くの謎を解明してきました。これに超音波パルス法（注6）と、SPring-8 や PF の強力な放射光 X 線を組み合わせることで、高圧高温下における音速の精密測定が可能になります。しかし、10 万気圧を超える高圧下では安定した高温発生が難しくなること、加圧に伴い試料体積が減少し試料からの超音波エコーが弱くなることなど技術的な課題が山積しており、この手法による液体鉄合金の音速測定は従来 8 万気圧以下に限られていました。

本研究グループは、高圧実験技術と超音波測定技術の高度化を進めた結果、これまで不可能だった火星コア最上部に相当する 20 万気圧という極限環境下においても、高精度で液体鉄合金の音速を測定することに成功しました。その結果、火星コア条件（約 20~40 万気圧）の大部分で、硫黄含有量によって液体鉄-硫黄合金の音速がほとんど変わらないことが明らかになりました。これは、従来の考え通り、火星コアが液体鉄-硫黄合金の場合、その地震波速度は硫黄量に関わらず今回の測定値と一致する必要があります。

一方、火星探査で得られる火星コアの地震波速度が本測定結果と異なる場合、シリコンや酸素など別の不純物の存在を意味します。シリコンと酸素は火星のマントルの主要元素であり、火星が微惑星の衝突によって大規模に融解した場合、両元素はコアにも取り込まれます。近未来の火星コア探査と実験室での液体鉄-シリコン・酸素合金の音速測定の組み合わせにより、火星コア中のシリコン・酸素の存在、さらには火星がかつて巨大衝突を経験したかどうかを検証することが出来ます。

現在 JAXA は、火星衛星探査計画 MMX（2020 年代前半打ち上げ予定）を進めており、その目的の 1 つが、火星の 2 つの衛星フォボスとダイモスの起源の解明です。その有力な仮説が巨大衝突起源説です（月の成因と同じ）。このように本研究そして今後の研究の成果は、火星やその衛星の起源とも深く関わっている他、MMX ミッションとも密接な関連があります。

本研究成果は国際科学雑誌『*Nature Communications*』に 5 月 13 日に掲載される予定です。

#### 4. 発表内容：

##### 背景

火星は地球の次に研究が進んだ惑星であり、近年は探査が盛んに行われています。これまでの地球物理的観測や火星由来とされる隕石の研究から、火星にも金属コアがあり、それは液体

鉄-硫黄合金でできていると考えられてきました。しかし、これまで内部の探査が行われてこなかったため、火星内部の構造（例えばコアの大きさ）や化学組成に関しては未だよくわかっていません。ごく最近、NASAの火星内部探査を目的とした探査機インサイトによって、地震計が設置され、内部構造探査が進行中です。すでに数多くの火震（火星の地震）が観測されています。今のところ、火星の浅い部分を通った地震波しか観測されていませんが、今後火星コアを通過した地震波を観測することができれば、その地震波速度を知ることができます。

地震波速度の観測から火星コアの物質を特定するには、あらかじめ実験室で音速を測定しておく必要があります。火星コアは20万気圧以上の高圧下にあると考えられています。川井型マルチアンビルを使った高圧実験は、日本が世界をリードする研究手法で、これまでも地球や惑星深部の多くの謎を解明してきました。また超音波パルス法は、物質中を伝わる音速を測る手法の一つで、原理的に単純なことから産業分野でも広く使われています。これらにSPring-8やPFの強力な放射光X線を組み合わせることで、高圧高温下で音速の精密測定が可能になります。しかし、高圧下において液体試料が漏れないように封入し、なおかつ超音波の反射波を得るために試料の反射面を超音波振動子と平行に保たなくてはならないため、非常に高い技術力を必要とされます。特に、10万気圧を超える高圧下では安定した高温発生が難しくなること、加圧に伴い試料体積が減少し試料からの超音波エコーが弱くなることなど技術的な課題が山積しており、この手法による液体鉄合金の音速測定は従来8万気圧以下に限られていました。

## 研究手法と成果

本研究グループは、上記の問題を解決するために、鉄合金液体の音速測定に特化したセラミックス円筒ヒーターを開発しました。また、超音波振動子のサイズの最適化や張り付け技術の高度化により、高強度でありながら低ノイズな超音波信号の取得を可能にしました。その結果、火星コアの圧力に相当する20万気圧という極限環境下においても、高精度な音速測定を実現しました。

実験は、PFのビームラインAR-NE7AとSPring-8のビームラインBL04B1において行いました。川井型マルチアンビル装置を使って、目的の圧力まで荷重をかけ、その後セラミックスヒーターを使って加熱することにより、試料を高圧高温にし、融解させます。高温高圧下での試料長は、X線画像（レントゲン写真）から決定します（図1）。試料近くに取り付けた超音波振動子によって、電気信号を超音波信号に変換し、超音波が試料に伝播します。試料の前面と背面で反射した超音波パルスは来た道を通り、再度電気信号に変換されてオシロスコープで観測されます。この試料前面で反射した波と背面で反射した波の到達時間の差から試料中の超音波の往復の伝播時間がわかるので、試料長をこの伝播時間で割ることによって試料中の音速を求めることができます。このような実験を圧力と試料中の硫黄量を変えて何度も実験し、最終的に火星コア最上部に相当する20万気圧まで、液体鉄-硫黄合金の音速の圧力・温度・硫黄量依存性を明らかにしました。その結果、火星コアの条件下（約20~40万気圧）では、その音速は温度や硫黄量にほとんど依存しない（圧力もしくは深さのみで決まる）ことが明らかになりました（図2）。したがって、従来の仮説通り、もし火星コアが液体鉄-硫黄合金である場合、その硫黄量に依らず（純粋な鉄であっても）、観測される地震波速度は本研究で測定された値に一致する必要があります。一方、異なる場合は、シリコンや酸素など別の不純物の存在を意味します。

## 今後の展望と社会的意義

火星のコアの化学組成（コア中の不純物の種類と量）は、火星の起源と深く関わっています。近い将来、NASA のインサイトをはじめとする火星内部探査ミッションによって火星コアの地震波速度が決定され、硫黄が主要な不純物ではない（もしくは硫黄以外の不純物も含まれている）とわかった場合、火星の起源を見直す必要があります。鍵となるのがシリコンと酸素です。

現在日本の JAXA は、火星の 2 つの衛星フォボスもしくはダイモスに探査機を送る、火星衛星探査計画 MMX（2020 年代前半打ち上げ予定）を進めています。地球の場合、原始地球に微惑星が衝突し（巨大衝突）、月が誕生したとされています。同じように火星も巨大衝突を経験し、これら 2 つの衛星が誕生したのか、それとも火星の重力によって微惑星が捕獲されただけなのか、衛星からサンプルを持ち帰ってどちらが正しいのか決着をつけようとしているのです。

もし火星が巨大衝突を経験し大規模に融解した場合、火星マンツルの主要元素シリコンと酸素はコアにも取り込まれます。近未来観測されるであろう火星コアの地震波速度と、今後の実験室での液体鉄-シリコン・酸素合金の音速測定との組み合わせにより、火星コア中のシリコン・酸素の存在を検証することができます。したがって、火星が巨大衝突を経験したかどうかをこの手段でも検証することにより、MMX ミッションと連携した、火星の形成プロセスの解明に関する大きな成果が期待されます。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「*Nature Communications*」

論文タイトル：Effect of sulfur on sound velocity of liquid iron under Martian core conditions

著者：Keisuke Nishida\*, Yuki Shibasaki, Hidenori Terasaki, Yuji Higo, Akio. Suzuki, Nobumasa Funamori, Kei Hirose (\*corresponding author)

DOI 番号：10.1038/s41467-020-15755-2

アブスト URL：<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15755-2>

## 6. 用語解説：

注 1) 川井型マルチアンビル

8 個の立方体アンビルを大型のプレスで加圧し、中心に置かれた試料に力を集中することにより高い圧力を発生させる装置。通常、アンビル材として超硬合金が用いられ、約 30 万気圧までの実験が可能です。

注 2) 大型放射光施設 SPring-8

兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高性能の放射光を生み出す、理化学研究所が所有する放射光施設で、その利用者支援等は高輝度光科学研究センター（JASRI）が行っています。

SPring-8 の名前は Super Photon ring-8GeV に由来。放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げた時に発生する、細く強力な電磁波のことです。SPring-8 では、この放射光を用いて、ナノテクノロジー、バイオテクノロジーや産業利用まで幅広い研究を行っています。

注3) 放射光実験施設フォトンファクトリー (PF)

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のつくばキャンパスにある放射光施設です。電子加速器から生まれる放射光で、物質・生命の構造から機能発現のしくみを明らかにする研究を推進しています。PF リング (2.5 GeV)、PF アドバンスリング (PF-AR, 6.5 GeV) という、特徴ある2つの放射光専用の光源加速器を有し、KEK で培ってきた放射光技術・加速器技術により世界最先端の研究の場を提供しています。

注4) 火星コア

火星は半径約 3400 km の天体です。火星コアは、中心から半径約 1800 km の領域で、主に鉄でできていると考えられています。不純物として硫黄を多く含むと考えられていますが、詳細な化学組成は不明です。地球のようなグローバルな火星磁場はないため、かつては液体のコアは存在しないという説が有力でしたが、近年の観測からは液体であることが示唆されています。

注5) インサイト (InSight : Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport)

インサイトはアメリカ航空宇宙局 (NASA) が開発した火星深部探査を目的とした探査機で、地震計、熱流量計を搭載しています。2018年11月26日に火星に着陸し、現在も観測が進行中です。すでに150回以上の火星の地震観測に成功しています。

注6) 超音波パルス法

超音波パルスを試料に照射し、試料中の超音波の伝播時間と、試料の長さから速度を求めることができます。川井型マルチアンビルと組み合わせる場合、試料の長さを強力な放射光 X 線を使った X 線画像 (レントゲン写真) から求める必要があります。

7. 添付資料 :

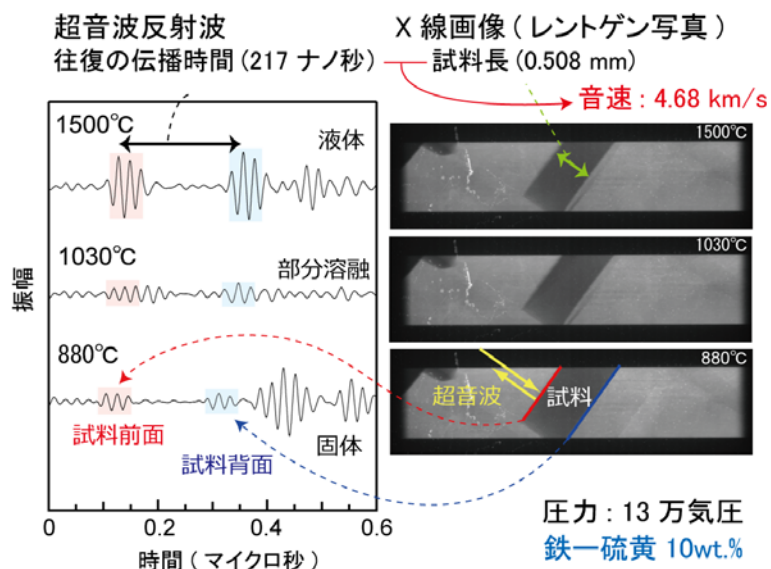


図1 : 13 万気圧における、鉄-10wt%硫黄合金( $\text{Fe}_{80}\text{S}_{20}$ )の超音波信号と X 線画像

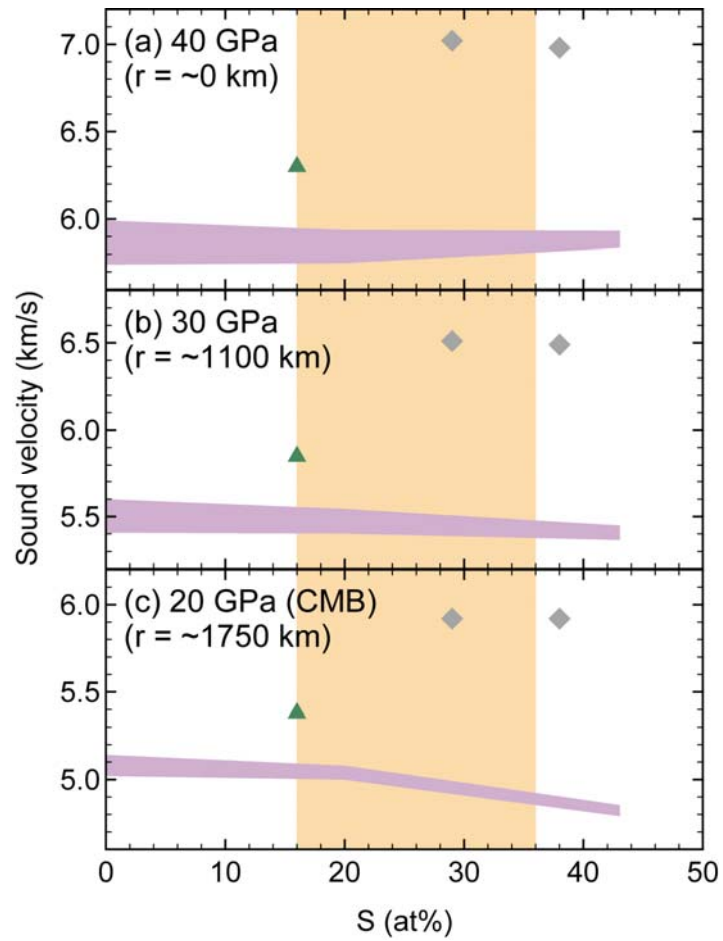


図2： 硫黄量を関数としてプロットした、火星コア条件での液体鉄-硫黄合金の音速（紫色）。オレンジの領域は過去に見積もられたコア中の硫黄量。緑と灰色のシンボルは、液体鉄-炭素合金、液体鉄-シリコン合金の測定値。