



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	炭素質隕石に記録された二種類の起源を持つ水
Author(s)	塚本, 尚義; Piani, Laurette
Citation	低温科学, 78, 259-264
Issue Date	2020-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.78.259
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77791
Type	departmental bulletin paper
File Information	29_p259-264.LT78.pdf



炭素質隕石に記録された二種類の起源を持つ水

塚本 尚義^{1)*}, Laurette Piani²⁾

2019 年 10 月 31 日受付, 2019 年 11 月 13 日受理

炭素質小惑星は太陽系内側部の水の主な供給者かもしれない, そして, 地球に水をもたらした源かもしれない. 始原隕石, 例えば炭素質隕石, の水素同位体は小惑星形成時の水の貯蔵庫の起源を考える時に有用である. この時, 集積前の状態と集積後の母天体プロセスを区別するには微小部分の同位体分析が必要である. 我々は 6 個の CM コンドライトに対し水素同位体分析を行い, D/H 比の高い有機物に混じっている D/H 比の低い水成分 ($\delta D = -350 \pm 40\%$) を見つけた. この D/H 比の低い水は原始太陽系円盤内側領域の水を代表していると考えられる. また, Paris コンドライトの水質変質が少ない部分から, 水質変質前にすでに存在していた含水物質 ($\delta D_{\text{Paris}} \geq -69 \pm 163\%$) が見つかった. この Paris コンドライトの含水物質の D/H 比の高い特徴は, 原始太陽系円盤外側領域から内側領域への水の輸送が太陽系形成初期数百万年間以内に活発であったことを示している.

The dual origin of water in carbonaceous asteroids revealed by CM chondrites

Hisayoshi Yurimoto¹ and Laurette Piani²

Carbonaceous asteroids represent the principal source of water in the inner Solar System and may have been one of the main contributors in the delivery of water to Earth. Hydrogen isotopes in water-bearing primitive meteorites, for example, carbonaceous chondrites, constitute a unique tool for deciphering the sources of water reservoirs at the time of asteroid formation. However, fine-scale isotopic measurements are required to unravel the effects of parent body processes on the pre-accretion isotopic distributions. Here, we report in situ micrometer-scale analyses of hydrogen isotopes in six CM carbonaceous chondrites, revealing a dominant deuterium-poor water component ($\delta D = -350 \pm 40\%$) mixed with deuterium-rich organic matter. We suggest that this deuterium-poor water corresponds to a ubiquitous water reservoir in the inner protoplanetary disk. A deuterium-rich water signature has been preserved in the least altered part of the Paris chondrite ($\delta D_{\text{Paris}} \geq -69 \pm 163\%$) in hydrated phases possibly present in the CM rock before alteration. The presence of the deuterium-enriched water signature in Paris may indicate that transfers of ice from the outer to the inner Solar System were significant in the first million years of Solar System history.

キーワード: 原始惑星系円盤, コンドライト, 水, 水素同位体, 小惑星

Protoplanetary disk, chondrite, water, hydrogen isotope, asteroid

1. イントロダクション

地球上の水素, 炭素などの揮発性元素の起源は水や生命の起源と直結するものであり, 太陽系の初期進化や惑

星形成の化学的プロセスやダイナミックスを知るためにも重要である (Marty et al., 2016). 隕石や彗星物質は 45 億年前の原始惑星系円盤中に存在していた揮発性元素を保存した貯蔵庫であると考えられている. しかしな

*連絡先

塚本 尚義

北海道大学理学研究院

〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目

e-mail: yuri@ep.sci.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学理学研究院

Natural History Sciences, Hokkaido University, Sapporo, Japan

2) CPRG, UMR 7358 CNRS, Université de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

がら、隕石母天体や彗星で起こった変質作用、例えば、水質変質や熱変成、の効果を考慮する必要がある。これらの作用により原始惑星系円盤中の揮発性元素の状態がどのように変化してしまったかについてもきちんと理解されているわけではない (Alexander et al., 2010; Oba and Naraoka, 2009; Remusat et al., 2010)。

CM タイプと分類されている炭素質コンドライトは、集積後の初期地球に降り注いだ揮発性成分に富む物質 (レイトベニア) の主要なものと考えられている (Gounelle et al., 2005)。CM コンドライトは水質変質の程度にバラツキが大きく、非常に変質したもの (岩石学的サブタイプ 2.0) から部分的に変質したもの (岩石学的サブタイプ 2.7/2.9) にわたっている (Hewins et al., 2014; Marrocchi et al., 2014; Rubin et al., 2007)。全ての CM コンドライトは多量の含水鉱物と有機物を含み (Alexander et al., 2012; Alexander et al., 2007; Robert and Epstein, 1982)、有機物は可溶性有機物と不溶性有機物の両方を含んでいる (Remusat, 2015)。マイクロメーターからナノメーターサイズの有機物はコンドライトのマトリックス中に含水鉱物と共に存在している (Le Guillou et al., 2014)。このマイクロスケールでの共存関係は、これらの各相に含まれているそれぞれの揮発性成分の分離と分析を困難にしている (Bonal et al., 2013; Deloule and Robert, 1995; Piani et al., 2015)。

水素同位体は、隕石母天体の水と有機物との間で起こった化学過程のトレーサーであり、小惑星や惑星に集積する物質の起源を決定するために有用である。CM コンドライトと CR コンドライトの全岩同位体分析により、D/H 比と C/H 比の間に正の綺麗な相関があることが示されている (Alexander et al., 2012)。この相関は、(1) コンドライトの全岩水素同位体組成は、D/H 比が低く炭素成分に欠乏した成分 (含水鉱物の水に対応すると考えられる) と D/H 比が高い有機物との混合であり、(2) この相関関係を C/H=0 に外挿した時の水素同位体比は、元々の水成分の水素同位体比であることを示唆している。元々の水成分の水素同位体比は各隕石グループごとに異なっており、例えば、CM コンドライトが $D/H = (87 \pm 4) \times 10^{-6}$ ($\delta D = -444 \pm 23\%$)、CR コンドライトが $D/H = (171 \pm 17) \times 10^{-6}$ ($\delta D = 96 \pm 110\%$) である。これらの同位体比の値は、原始惑星系円盤内側部の水成分の特徴をあらわしていると考えられる。しかしながら、全岩分析による水素同位体比から、小惑星上で起こった水と有機物との間の化学交換を解釈することは困難で、一つのコンドライト試料中から含水鉱物と有機物のそれぞれの水素同位体比を測定することは、これら両者

がコンドライトのマトリックス中に密に混合して接しているのが難しい。

最近、私たちは、二次イオン質量分析法 (Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS) を用いて、6 個の CM コンドライトのマトリックス中の D/H 比と C/H 比を測定した (Piani et al., 2018)。SIMS はマイクロメータースケールにおけるその場分析なので、測定された D/H 比と C/H 比は、マトリックス中における分析場所の含水鉱物と有機物の混合割合の結果と対応している。コンドライト中の不溶性有機物の D/H 比は、含水鉱物のものより大きいので、全岩分析の場合にコンドライト間で見られたように、一つのコンドライト内でも、D/H 比と C/H 比は正の相関を示すことが期待される。この関係により、全岩分析の時と同様の方法で、各コンドライト中の水の D/H 比を推定できる。したがって、水質変質の程度が異なる CM コンドライトの水の D/H 比を比較することにより、次のことを検討できる：(1) 水と有機物との間の水素同位体交換の程度 (もし水の D/H 比が含水鉱物と有機物の量比と関係があるならば)、(2) 水質変質が起こった物理化学条件、(3) 原始太陽系円盤の原始的な揮発性成分の貯蔵庫の D/H 比。本報告では、この結果 (Piani et al., 2018) について簡単に報告する。

2. CM コンドライトのマトリックスにおける D/H 比と C/H 比の変動

CM コンドライトには色々な水質変質の程度のものがある。我々は、その範囲をカバーして、地球上での風化が少ない、6 個の CM コンドライトのマトリックス部を SIMS により分析した：Sayama CM2, 強変質, 変質度 1.1; Cold Bokkeveld CM2.2, 中変質, 変質度 1.03; Mighei CM2.4, 部分変質, 変質度 0.77; Murray CM2.4/2.5, 部分変質, 変質度 0.57; Murchison CM2.5, 部分変質, 変質度 0.43; Paris CM2.7, 低変質, 変質度 0.27 (変質度：マトリックス中の蛇紋石の Fe^{3+} 含有量から定義される水質変質の度合い (Browning et al., 1996; Marrocchi et al., 2014))。これらの各コンドライトにおいて、二次イオン強度比 D/H 比と二次イオン強度比 C/H 比は正の相関を示した (図 1)。これは、マトリックス中の無機物成分と有機物成分の混合比が測定領域ごとに異なり、無機物成分が低い D/H 比、有機物成分は高い D/H 比を持っていることを意味している。したがって、無機物成分が持つ低い D/H 比は、y 切片の値で表すことができ、この値は含水鉱物の D/H 比である (約 100×10^{-6})。CM コンドライトの主な含水鉱物は含水層

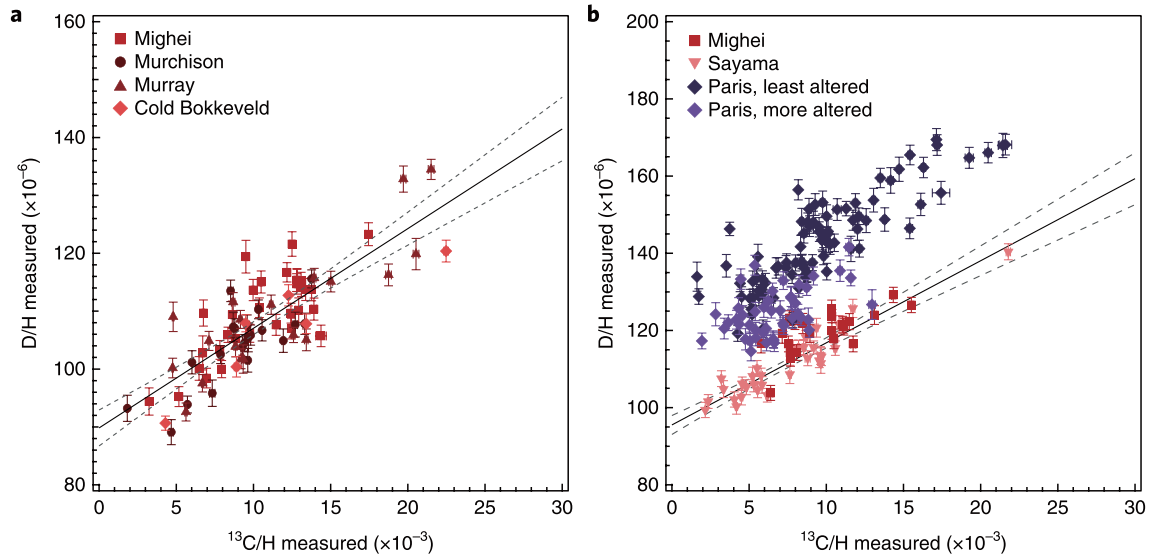


図1：CMコンドライトのマトリックスの二次イオン強度比 D/H と C/H 比の関係。Piani et al. (2018) を修正。

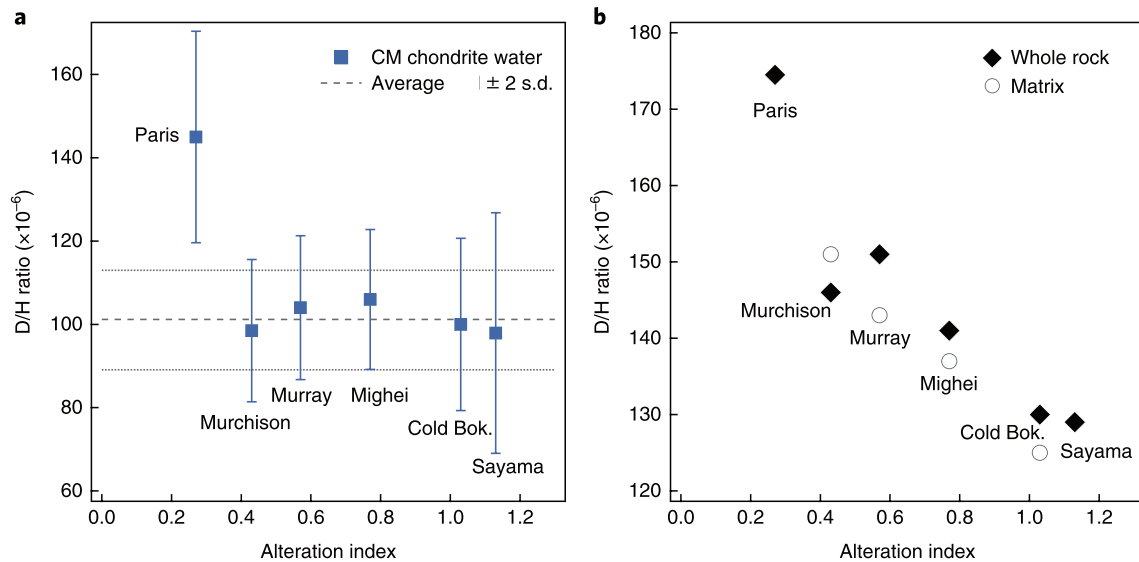


図2：CMコンドライトにおける D/H 比と水質変質度との関係。Piani et al. (2018) を修正。

状ケイ酸塩（主に Fe, Mg-serpentine, cronstedtites）である。ただし、変質が小さい Paris コンドライトには含水アモルファスケイ酸塩も多く含んでいる。これらの含水鉱物の D/H 比は、その含水鉱物が生じた時に存在していた水の D/H 比を直接表していると考えられる。二次イオン強度比から同位体比への変換は、既知の同位体比を持つ標準試料を用いて補正した。

Paris コンドライト以外の CM コンドライトから推定された CM コンドライト母天体中の水の D/H 比は $101(6) \times 10^{-6}$ ($\delta D = -350(40)\%$) であり（括弧内の数字は2倍の標準偏差）、全岩コンドライト分析で求められた値 ($125 \sim 151 \times 10^{-6}$) (Alexander et al., 2012; Eiler and Kitchen, 2004) より小さかった（図2）。これは、全岩コ

ンドライト分析による D/H 比には、D/H 比と C/H 比が大きい有機物が大きく寄与していることを意味している。また、我々の値は、全岩分析値と不溶性有機物の値を用いて相互の量のマスバランスにより推定した CM コンドライト母天体中の水の D/H 比の推定値 ($126 \sim 142 \times 10^{-6}$) (Alexander et al., 2010; Robert, 2002) よりも小さい。従って、このマスバランス推定による推定結果では、可溶性有機物の寄与を考慮していないためと不溶性有機物量の不確定性が大きいという理由により、これまでの研究は D/H 比の大きい有機物成分の寄与を小さく見積もっているのかもしれない。

3. Paris コンドライトの D/H 比

水質変質の小さい Paris コンドライトの母天体中の水の D/H 比 ($145(25) \times 10^{-6}$; $\delta D = -69 \pm 163\text{‰}$) は, その他の水質変質の大きい CM コンドライトの値より大きい (図 2a). また, その他の水質変質の大きい CM コンドライトの D/H 比は, 変質度に関わらず, 一定の値を持っている. これは, 水と他の水素を含む物質との間で, 水質変質の進行に伴い同位体交換反応や化学反応が進行するのではなく, 含水鉱物の D/H 比は水質変質の初期段階で決定していることを示唆している. 一方, CM コンドライト間の全岩酸素同位体比は水質変質の進行に伴い軽くなっていく (Clayton and Mayeda, 1999). また, CM コンドライト間の全岩水素同位体比も水質変質の進行とともに軽くなる (図 2b). この全岩同位体比の変化とコンドライトの母天体中の水の D/H 比の変化の違いは, 元々 CM コンドライト中にあった D/H 比の大きい成分と D/H 比の小さい水成分との反応が, 水質変質の進行により徐々に起こり, その結果, 全岩 D/H 比が徐々に小さくなったとする考えに反する. したがって, 全岩水素同位体比も水質変成初期に決定されるのだけでも, D/H 比の小さい水の量が, 水質変成が小さい母天体の部分では少なく, 水質変質の大きい母天体部分では多かったため, またその時, 水の量が多いと水質変質の度合いが大きくなるので, この全岩同位体比の変化と水質変質の度合いの相関が見られると考えられる.

Paris コンドライトのマトリックスの中で, 水質変質が少ないマトリックスの部分の D/H 比が大きく, C/H 比の変動も大きい. しかし, 水質変質が大きいマトリックスの部分は, D/H 比が小さく, 他の CM コンドライトの D/H 比との間にプロットされる (図 1). また, 水質変質が大きいマトリックスの C/H 比も, 他の CM コンドライトの C/H 比の変動幅に収まっている. つまり, Paris コンドライトの水質変質が小さいマトリックスに見られる大きい D/H 比は, CM コンドライト母天体で水質変質が起こった前の状態を留めていると考えられる.

Paris コンドライトの含水量 (4.8 wt%) は他の CM コンドライト (10~13 wt%) よりはるかに少ない (Alexander et al., 2012; Browning et al., 1996; Piani et al., 2018; Vacher et al., 2016). その水質変質が少ない部分のマトリックスは, 主に, Fe 硫化物の包有物を持つマイクロメーターサイズのアモルファスケイ酸塩よりなる (Leroux et al., 2015). この組織は, あまり水質変質や熱変成を被っておらず, 母天体上において水循環がなかったことを示す. したがって, Paris コンドライトの水質

変質が少ない部分のマトリックスの水素同位体的特徴は, 母天体集積前に獲得していたことを示し, 一方, Paris コンドライトの水質変質が大きいマトリックス部の水素同位体的特徴は, 水質変成を少し受けた特徴を示している. この考察は, Paris コンドライトでは, 他の CM コンドライトでは見つかっていない始原的特徴を持つ Ca 炭酸塩鉱物が見つかっており, その酸素同位体的特徴からも支持される (Vacher et al., 2016). この水素と酸素の同位体的特徴は, Paris コンドライトに二つの起源を持つ水が存在していることを示している. この Paris コンドライトの水の同位体的特徴は, 他の 5 つの CM コンドライトでは, 集積後に起こった, より D/H 比の低い大量の水成分 ($101(6) \times 10^{-6}$ ($\delta D = -350(40)\text{‰}$)) による母天体上の水質変質により消されてしまった.

前述したように, このより D/H 比の低い大量の水成分は, 隕石母天体の水質変質中には水素同位体的に変化を起こさない. また, この同位体組成は, その他の約 50 個の CM コンドライトの全岩水素同位体組成 (Alexander et al., 2012) と一致している. これは, この水成分が CM コンドライト母天体を集積した時の主な水であったことを示している. 興味あることに, 同様の D/H 比を持つ水成分が, CR, CH, 南極微隕石, 惑星間塵, 分化隕石 (ユークライトとアングライト) から得られている (Aléon et al., 2001; Bonal et al., 2013; Deloule et al., 1998; Engrand et al., 1999; Sarafian et al., 2017; Sarafian et al., 2014; Stephant et al., 2017; van Kooten et al., 2017). この水は, 原始太陽系円盤のスノーライン内側領域 (原始太陽系円盤内側領域とよぶ) や CM コンドライト母天体集積領域の主な水に対応しているのかもしれない.

4. 原始太陽系円盤内側領域の水と Paris コンドライトの水の関係

この原始太陽系円盤内側領域の水の D/H 比の低い値は, 円盤内側領域において, 太陽組成の D/H 比を持つ水素分子と同位体交換平衡にある水蒸気との間の水素同位体分別より作ることができる (Jacquetta and Robert, 2013; Yang et al., 2013). 太陽組成として分子雲の水素分子の D/H 比 (Geiss and Gloeckler, 2003) を仮定し, 水蒸気と水素分子の平衡同位体分別係数 (Richet et al., 1977) と水蒸気が凝縮する時の同位体分別係数 (Lécluse and Robert, 1994) を用いると, 350 K で水素分子と同位体平衡に達した水蒸気が 160 K で凝縮すると, この原始太陽系円盤内側領域の水の D/H 比になる. もう一つの

可能性は、350 K 以上の温度で水素分子と同位体平衡だった水と太陽系外縁から運ばれてきた D/H 比の高い水とが混合して、原始太陽系円盤内側領域の水の D/H 比になったというプロセスである。

Paris コンドライトの水は、他の CM コンドライトに比べて D/H 比が高く、CR コンドライトの D/H 比に似ている。しかし、CR コンドライトはマトリックス中において D/H 比の変動が大きく、この変動はマトリックス中に散在する金属粒子による水の還元反応のような二次過程によると考えられている (Bonai et al., 2013)。最も変質の少ない普通コンドライトの一つである Semarkona 隕石 (LL 3.0) においてもマトリックス中において大きな D/H 比の変動が報告されており、これは分子雲に起源を持っている D/H 比の高い水が溶融したことによる水質変成の結果だと考えられている (Deloule and Robert, 1995; Piani et al., 2015)。一方、Paris コンドライトでは、CR コンドライトや Semarkona 隕石のようなプロセスを考えることは難しい、なぜなら、Paris コンドライトの D/H 比は水質変成が進むと小さくなるからである。従って、Paris コンドライトの高い D/H 比は CM 母天体に集積する前の材料の中の含水鉱物であり、そして、集積時に他の CM コンドライトが持っているような原始太陽系円盤内側領域の水蒸気が凝縮した低い D/H 比を持つ水と一緒に集積して、その後その水により CM コンドライト母天体の水質変質が引き起こされたように思われる。事実、CM コンドライトの鉱物学から集積前に存在していたと考えられる含水鉱物が報告されている (Howard et al., 2011)。集積前の含水鉱物は原始惑星系円盤中の氷に富む領域の衝撃波によるコンドリュール形成の副産物かもしれない (Ciesla et al., 2003)。最近、非晶質 Mg_2SiO_4 が原始惑星系円盤の水蒸気環境で含水化しやすいことが判明した (Yamamoto et al., 2018; Yamamoto et al., 2019)。そうすると、Paris コンドライトの含水鉱物の高い D/H 比と炭酸塩鉱物の ^{16}O 成分に乏しい特徴は、原始惑星系円盤外側領域の水の特徴と対応しており、分子雲の水の特徴 (Yurimoto and Kuramoto, 2004) の名残りなのかもしれない。従って、Paris コンドライトに見られる高い D/H 比は、CM コンドライト母天体集積の前の太陽系形成最初の数百万年間に、水の輸送が原始太陽系円盤外側から内側に活発に起こっていたことを示している。

参考文献

Aléon, J., Engrand, C., Robert, F. and Chaussidon, M. (2001)

- Clues to the origin of interplanetary dust particles from the isotopic study of their hydrogen-bearing phases. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 4399–4412.
- Alexander, C. M. O. D., Bowden, R., Fogel, M. L., Howard, K. T., Herd, C. D. K. and Nittler, L. R. (2012) The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets. *Science*, **337**, 721–723.
- Alexander, C. M. O. D., Fogel, M., Yabuta, H. and Cody, G. D. (2007) The origin and evolution of chondrites recorded in the elemental and isotopic compositions of their macromolecular organic matter. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 4380–4403.
- Alexander, C. M. O. D., Newsome, S. D., Fogel, M. L., Nittler, L. R., Busemann, H. and Cody, G. D. (2010) Deuterium enrichments in chondritic macromolecular material—Implications for the origin and evolution of organics, water and asteroids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 4417–4437.
- Bonai, L., Alexander, C. M. O. D., Huss, G. R., Nagashima, K., Quirico, E. and Beck, P. (2013) Hydrogen isotopic composition of the water in CR chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **106**, 111–133.
- Browning, L. B., McSween, H. Y. and Zolensky, M. E. (1996) Correlated alteration effects in CM carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 2621–2633.
- Ciesla, F. J., Lauretta, D. S., Cohen, B. A. and Hood, L. L. (2003) A Nebular Origin for Chondritic Fine-Grained Phyllosilicates. *Science*, **299**, 549–552.
- Clayton, R. N. and Mayeda, T. K. (1999) Oxygen isotope studies of carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**, 2089–2104.
- Deloule, E. and Robert, F. (1995) Interstellar water in meteorites? *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 4695–4706.
- Deloule, E., Robert, F. and Doukhan, J. C. (1998) Interstellar hydroxyl in meteoritic chondrules: implications for the origin of water in the inner solar system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **62**, 3367–3378.
- Eiler, J. M. and Kitchen, N. (2004) Hydrogen isotope evidence for the origin and evolution of the carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 1395–1411.
- Engrand, C., Deloule, E., Robert, F., Maurette, M. and Kurat, G. (1999) Extraterrestrial water in micrometeorites and cosmic spherules from Antarctica: an ion microprobe study. *Meteorit. Planet. Sci.*, **34**, 773–786.
- Geiss, J. and Gloeckler, G. (2003) Isotopic composition of H, He and Ne in the protosolar cloud. *Space Sci. Rev.*, **106**, 3–18.
- Gounelle, M., Engrand, C., Alard, O., Bland, P. A., Zolensky, M. E., Russell, S. S. and Duprat, J. (2005) Hydrogen isotopic composition of water from fossil micrometeorites in howardites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 3431–3443.
- Hewins, R. H., Bourot-Denise, M., Zanda, B., Leroux, H., Barrat, J.-A., Humayun, M., Göpel, C., Greenwood, R. C., Franchi, I. A., Pont, S., Lorand, J.-P., Cournède, C., Gattacceca, J.,

- Rochette, P., Kuga, M., Marrocchi, Y. and Marty, B. (2014) The Paris meteorite, the least altered CM chondrite so far. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **124**, 190–222.
- Howard, K. T., Benedix, G. K., Bland, P. A. and Cressey, G. (2011) Modal mineralogy of CM chondrites by X-ray diffraction (PSD-XRD): Part 2. Degree, nature and settings of aqueous alteration. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **75**, 2735–2751.
- Jacqueta, E. and Robert, F. (2013) Water transport in protoplanetary disks and the hydrogen isotopic composition of chondrites. *Icarus*, **223**, 722–732.
- Le Guillou, C., Bernard, S., Brearley, A. J. and Remusat, L. (2014) Evolution of organic matter in Orgueil, Murchison and Renazzo during parent body aqueous alteration: In situ investigations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **131**, 368–392.
- Lécluse, C. and Robert, F. (1994) Hydrogen isotope exchange reaction rates: Origin of water in the inner solar system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 2927–2939.
- Leroux, H., Cuvillier, P., Zanda, B. and Hewins, R. H. (2015) GEMS-like material in the matrix of the Paris meteorite and the early stages of alteration of CM chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **170**, 247–265.
- Marrocchi, Y., Gounelle, M., Blanchard, I., Caste, F. and Kearsley, A. T. (2014) The Paris CM chondrite: Secondary minerals and asteroidal processing. *Meteorit. Planet. Sci.*, **49**, 1232–1249.
- Marty, B., Avicé, G., Sano, Y., Altwegg, K., Balsiger, H., Hässig, M., Morbidelli, A., Mousis, O. and Rubin, M. (2016) Origins of volatile elements (H, C, N, noble gases) on Earth and Mars in light of recent results from the ROSETTA cometary mission. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **441**, 91–102.
- Oba, Y. and Naraoka, H. (2009) Elemental and isotope behavior of macromolecular organic matter from CM chondrites during hydrous pyrolysis. *Meteorit. Planet. Sci.*, **44**, 943–953.
- Piani, L., Robert, F. and Remusat, L. (2015) Micron-scale D/H heterogeneity in chondrite matrices: A signature of the pristine solar system water? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **415**, 154–164.
- Piani, L., Yurimoto, H. and Remusat, L. (2018) A dual origin for water in carbonaceous asteroids revealed by CM chondrites. *Nature Astronomy*, **2**, 317–323.
- Remusat, L. (2015) Organics in primitive meteorites. *Planet. Mineral.*, **15**, 33–65.
- Remusat, L., Guan, Y., Wang, Y. and Eiler, J. M. (2010) Accretion and preservation of D-rich organic particles in carbonaceous chondrites: Evidence for important transport in the early solar system nebula. *Astrophys. J.*, **713**, 1048–1058.
- Richet, P., Bottinga, Y. and Javoy, M. (1977) A review of hydrogen, carbon, nitrogen, oxygen, sulphur, and chlorine stable isotope fractionation among gaseous molecules. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **5**, 65–110.
- Robert, F. (2002) Water and organic matter D/H ratios in the solar system: a record of an early irradiation of the nebula? *Planet. Space Sci.*, **50**, 1227–1234.
- Robert, F. and Epstein, S. (1982) The concentration and isotopic composition of hydrogen, carbon and nitrogen in carbonaceous meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 81–95.
- Rubin, A. E., Trigo-Rodríguez, J. M., Huber, H. and Wasson, J. T. (2007) Progressive aqueous alteration of CM carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 2361–2382.
- Sarafian, A. R., Hauri, E. H., McCubbin, F. M., Lapen, T. J., Berger, E. L., Nielsen, S. G., Marschall, H. R., Gaetani, G. A., Righter, K. and Sarafian, E. (2017) Early accretion of water and volatile elements to the inner Solar System: evidence from angrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **375**, 20160209.
- Sarafian, A. R., Nielsen, S. G., Marschall, H. R., McCubbin, F. M. and Monteleone, B. D. (2014) Early accretion of water in the inner solar system from a carbonaceous chondrite-like source. *Science*, **346**, 623–626.
- Stephant, A., Remusat, L. and Robert, F. (2017) Water in type I chondrules of Paris CM chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **199**, 75–90.
- Vacher, L. G., Marrocchi, Y., Verdier-Paoletti, M. J., Villeneuve, J. and Gounelle, M. (2016) Inward radial mixing of interstellar water ices in the solar protoplanetary disk. *Astrophys. J.*, **827**, L1.
- van Kooten, E. M. M. E., Nagashima, K., Kasama, T., Wampfler, S. F., Ramsey, J. P., Frimann, S., Balogh, Z. I., Schiller, M., Wielandt, D. P., Franchi, I. A., Jørgensen, J. K., Krot, A. N. and Bizzarro, M. (2017) A divergent heritage for complex organics in Isheyevo lithic clasts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **205**, 119–148.
- Yamamoto, D., Kuroda, M., Tachibana, S., Sakamoto, N. and Yurimoto, H. (2018) Oxygen isotopic exchange between amorphous silicate and water vapor and its implications for oxygen isotopic evolution in the early solar system. *Astrophys. J.*, **865**, 98.
- Yamamoto, D., Tachibana, S., Kawasaki, N. and Yurimoto, H. (2019) Survivability of presolar oxygen isotopic signature of amorphous silicate dust in the protosolar disk. *Meteorit. Planet. Sci.*, doi:10.1111/maps.13365.
- Yang, L., Ciesla, F. J. and Alexander, C. M. O. D. (2013) The D/H ratio of water in the solar nebula during its formation and evolution. *Icarus*, **226**, 256–267.
- Yurimoto, H. and Kuramoto, K. (2004) Molecular cloud origin for the oxygen isotope heterogeneity in the solar system. *Science*, **305**, 1763–1766.