核合成起源同位体二分性と初期太陽系の進化

深井 稜汰[1]

2019年8月27日受領, 査読を経て2019年11月23日受理

(要旨) 太陽系の進化過程を考える上で，惑星形成以前の情報は不可欠である．コンドライト隕石は，原始太陽系星雲の物理化学過程を記録した未分化な隕石である．コンドライト隕石の全岩組成には，核合成起源の同位体異常が見られる．この同位体異常は，太陽系形成以前に作られたプレソーラー粒子が原始太陽系星雲で時空間的に不均質分布していたことに由来する．

近年，炭素質コンドライトのTi･Cr･Sr･Mo･Nd同位体組成は，エンスタタイトコンドライト・普通コンドライト・その他の分化隕石の同位体組成と異なっていることがわかった．この結果は，原始太陽系星雲の内側・外側領域に，同位体二分性が存在していたことを示唆する．二分された領域の同位体組成の違いを説明するには，木星コアによる原始太陽系星雲の空間的な分断が必要という解釈が主流になっている．本論文は同位体二分性を主なトピックとし，同位体組成の違いを生んだ物質・元素間の傾向の違いなどを総合的に議論する．

1. 序論

太陽系の固体物質，特に岩石惑星がどのように形成・進化してきたかを解明することは，近年の惑星科学研究においてますます重要になってきている．古典的な太陽系形成モデルによると，太陽系の微惑星は数マイクロメートルの微粒子が合体成長をくりかえし形成したと考えられている[1など]．そのため，現在の惑星の軌道・質量・化学組成といった特徴は，原始太陽系星雲における固体物質が受けた物理化学過程に由来している．原始太陽系星雲内の情報は，地球や火星のように大規模なコア―マントルの分化・ケイ酸塩層の分化を経験していない，未分化な小惑星由来のコンドライト隕石(以下コンドライト)に残されている．コンドライトは大きく4つの構成要素(難揮発性包有物・コンドリュール・Fe-Ni合金・マトリックス)からなる岩石で，エンスタタイトコンドライト・普通コンドライト・炭素質コンドライトの3種類に大分される．近年の小惑星探査において，はやぶさが普通コンドライトと類似した反射スペクトルを示す小惑星(S型小惑星)・はやぶさ2が炭素質コンドライトと類似した反射スペクトルを示す小惑星(C型小惑星)に着陸したことは有名である．コンドライトの鉱物学・地球化学的研究により，原始太陽系星雲における固体物質の凝縮過程・輸送過程など様々な現象が理解されている[2など]．

前述の構成要素の他に，コンドライトに微量に含まれている「プレソーラー粒子」は，隕石の化学的研究において非常に重要な物質である．プレソーラー粒子は，多くの元素において太陽系平均とは大きく異なる同位体組成を持っている[3など]．そのため，プレソーラー粒子は太陽系形成以前に存在した恒星で形成したと考えられている．コンドライト中に現存するプレソーラー粒子は，隕石母天体における変成や，原始太陽系星雲内の物理化学過程による同位体均質化を免れた先太陽系物質の生き残りである．お

1 .東京大学 理学系研究科 地殻化学実験施設
ryota.fukai@gmail.com

そらく，原始太陽系星雲にはより多くのプレソーラー粒子が存在していたが，上述の過程を経て，太陽系の固体物質の同位体組成は大局的には均質化したと考えられてきた．

一方，近年の研究成果により，多くのコンドライト全岩はTi･Cr･Sr･Mo･Ru･Ba･Nd･W同位体などで地球と異なる同位体組成をもつことがわかっている[4など]．この同位体変動は，隕石全岩の「核合成起源同位体異常」または「同位体異常」と呼ばれている．隕石全岩に同位体異常が存在することは，原始太陽系星雲においてプレソーラー粒子が時空間的に不均質分布していたことを示している．同時に，コンドライト母天体と地球が異なる時空間で形成したことを表している．つまり，プレソーラー粒子によって変動する同位体組成は，惑星物質の形成過程を辿る上での重要なトレーサーである．

同位体異常の起源を理解することは，原始太陽系星雲における熱過程や物質輸送過程を探る上で重要である．本論文では，まず核合成の種類や機構について解説(2章)した後に，近年話題を呼んでいる同位体異常の「二分性」に関する研究を中心に紹介する(3章)．最後に，結論と今後の展望を述べる(4章)．

2. 核合成起源同位体異常とは

固体物質のもつ同位体比は，大きく2つの要因によって変動する．1つは，質量依存同位体分別である．この分別は，同位体の質量数の差異に伴う化学平衡の平衡定数(平衡同位体効果)，運動エネルギー(動的同位体効果)の差によって生じる．もう1つの要因は，質量数の差異では定式化できない同位体分別(非質量依存同位体分別)である．非質量依存同位体分別は原子核の体積・形の差(フィールドシフト効果)･磁気モーメントの差(磁気同位体効果)などによって生じる．さらに非質量依存の同位体変動を起こすプロセスとして広く知られるのが，放射性元素の壊変による影響，大気の光化学反応，宇宙線照射による核反応，核合成などである．天然試料に観測されるこれらの非質量依存の同位体変動は，一般に同位体異常と呼ばれる．

本論文で紹介する同位体組成のデータは，全ての(質量分析計内・天然を問わず)質量依存同位体分別の効果を補正している．つまり，隕石試料の同位体比の差異は，非質量依存の同位体変動を反映する．扱う隕石試料・同位体の選定，結果の検証により，本論文で議論される隕石全岩に見られる同位体不均質性は，基本的に全て「核合成起源同位体異常」と解釈される．

プレソーラー粒子は顕著な核合成起源同位体異常を示し，漸近巨星分枝星や重力崩壊型超新星爆発における核合成過程を記録している．漸近巨星分枝星では，He燃焼殻に貯蔵された中性子がFeなどの原子核に捕獲され，遅い中性子捕獲反応(sプロセス)が起きる．sプロセスは主にFe-peak以降の元素からPbまでの元素を合成するので，漸近巨星分枝星由来プレソーラー粒子のSr・Mo・Ndなどは，sプロセスで出来た同位体(s核種)に富む同位体組成を持っている．さらに，漸近巨星分枝星由来プレソーラー粒子のもつ同位体組成は，理論的に得られたsプロセス端成分の同位体組成とよく一致している[5など]．

一方重力崩壊型超新星爆発では，その爆発的なエネルギーの解放によって，中性子過剰なFe-peak元素の合成(例：50Ti，54Cr)や速い中性子捕獲反応(rプロセス)などが起きる．rプロセスは主にFe-peak以降の元素からUまでの元素を合成する．重力崩壊型超新星爆発由来プレソーラー粒子についてはまだ情報が少なく，一部54Crの過剰を示す粒子の報告がある程度である[6，7]．重力崩壊型超新星爆発由来のプレソーラー粒子が，rプロセスで出来た同位体(r核種)に富む同位体組成を持っているかは未だ不明であり，重要な研究課題となっている．しかし，太陽系のFe-peakより重い元素は，概ね「s核種 ＋ r核種」で出来ていると言えるので，rプロセスで出来る同位体組成は (太陽系の平均同位体組成) － (sプロセスで出来る同位体組成：理論値 または漸近巨星分枝星由来プレソーラー粒子の測定値) という計算によって求められる．

このように，各恒星で出来たプレソーラー粒子が持つ同位体組成を端成分とすることで，隕石全岩に見られる同位体異常の起源を判別することができる．図2から4までの同位体比プロットには，s核種に富む(s-excess)，r核種に富む(r-excess)傾向がそれぞれ矢印で示されている．

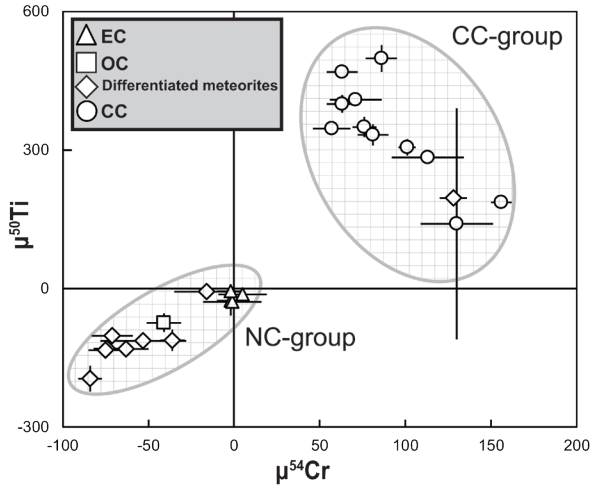

図1: 隕石全岩のμ54Crーμ50Tiデータを示す図(Cr: [9, 11–15], Ti: [14, 16–18]). 全てのデータは同一の隕石から得られており，特に同一研究グループ(Cr: [9] – Ti: [17]，またはCr–Ti: [14])からデータが報告されている場合は，重複するデータがあっても同一研究グループの報告のみ採用している. Warren [10]では，国際会議のアブストラクトのデータも含めコンパイルしているが，ここでは掲載していない. μiM = ((Rmeteorites / Rterrestrial) – 1) × 10^6), R = iM/jM を表す. プロットの誤差は，各論文に掲載されている測定誤差を示す.

3. 同位体二分性

3.1 同位体二分性の発見

隕石全岩に同位体異常があることは，2000年代に質量分析計の分析精度向上に伴って，様々な元素において明らかになりつつあった[8, 9など]. 炭素質コンドライトは特に大きな同位体異常を示し，エンスタタイトコンドライトや普通コンドライトは地球に近い組成・または区別できない組成を示す傾向にある. Warren [10]は，過去の研究で得られたTi・Cr同位体のデータを使って，地球を含む様々な惑星物質は同位体異常によって大きく2つのグループに分類されると提唱した(同位体二分性). 1つのグループは，炭素質コンドライトと一部の分化隕石で構成されるCC (Carbonaceous Chondrites) - groupである. もう一方のグループは，エンスタタイトコンドライト・普通コンドライト・(火星由来と考えられている)SNC隕石・(小惑星ベスタ由来と考えられている)HED隕石などで構成されるNC (Non-Carbonaceous meteorites)-groupである. Ti・Cr同位体比の二次元プロット上で，NC-groupとCC-groupは異なる傾きを持っている(図1). つまり，NC・CCの同位体二分性は，単純な二成分混合などの単一の物理化学過程では達成されない. 更に，NC・CC間には組成のギャップがあり，中間的な同位体組成をもつ物質がないことが見てとれる. これらの結果から，NC・CCには形成時に時空間的な分断があり，それぞれの形成領域で異なる物質輸送が進行していたと考えられる.

Warrenの結果をもとに，更に発展した解釈を導いたのがBudde et al. [19]，Kruijer et al. [20]である. 著者達はTi・Cr同位体の結果に続き，Mo同位体に同様の二分性を見出した. NC・CCはMo同位体比の二次元プロット上で，異なる回帰直線を作る(図2). CC-groupはNC-groupよりr核種に富んでおり，Ti・Cr同位体の結果と同様にNC・CCの中間的な同位体組成の物質は存在しない. NC・CCの回帰直線は切片が異なり，ほぼ平行な傾きを持つことから，単一の過程では両者のMo同位体組成を説明することはできない. さらに著者達はHf–W年代測定によってNC・CC母天体の分化年代の差を求め，NC・CCの時空間的な分断の存在をより明確に示した. それでは，原始太陽系星雲は一体何によって分断されTi・Cr・Mo同位体二分性を生んだのだろうか.

著者達はその原因を，他の岩石惑星より先に誕生

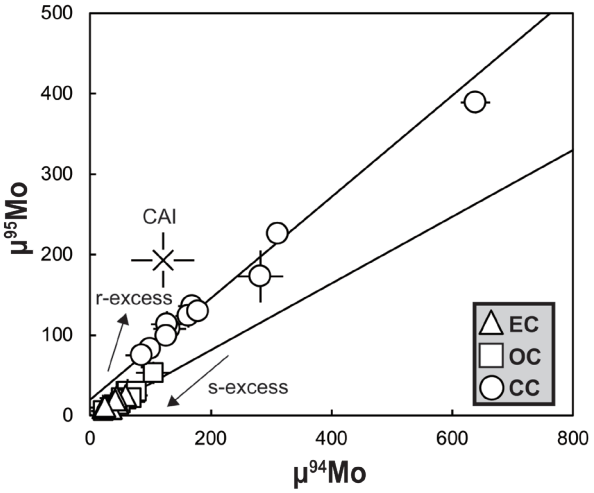

図2: 隕石全岩のμ94Mo－μ95Moデータを示す図(EC (Enstatite Chondrites), OC (Ordinary Chondrites): [21–23], CC: [19, 22–24], CAI: [25]). 2本の直線は, NC・CCそれぞれのプロットから得られた回帰直線である(計算には「ISOPLOT」を用いた). プロットの誤差は, 各論文に掲載されている測定誤差を示す.

した「木星コア」であろうと解釈した. より詳しいシナリオは以下の通りである. 木星による分断によって, 太陽系外側から内側へ粒子が落下することが阻害され, NC・CC領域の物質は混合しなかった. 分断が起きている間, NC・CCそれぞれの形成領域に存在する粒子は微惑星レベルに成長した. この時点でNC・CC領域のMo同位体組成には二分性が存在した. その後微惑星は木星の移動によって擾乱を受け, 現在の小惑星帯の軌道に輸送された(この部分はグランド・タックモデルと同様). この論文の発表以降, 同位体二分性の原因として「木星コア」の存在を前提とする論文が大半を占めるようになるほど, インパクトのある説であった.

3.2　同位体二分性の起源

同位体二分性について議論するとき, 原因となる物質 (例えば漸近巨星分枝星由来・超新星爆発由来などのプレソーラー粒子)を考えることは, 原始太陽系星雲の物理化学過程を理解する上で重要である. Mo同位体二分性を発見したKruijerらは, 具体的にどのような物質の空間的不均質性がNC・CCの同位体比の違いを生んだのか, 深く言及しなかった. 後続の論文では, Mo同位体二分性をつくった物質について詳しく議論がなされた. Worsham et al. [21]は, 重力崩壊型超新星爆発由来プレソーラー粒子がCC形成領域に選択的に輸送されたことで, CC-groupがr核種に富む同位体組成を獲得した, というモデルを提案した(図2).

一方で, Fukai and Yokoyama [26]は, NC・CC両者を含むコンドライト全岩のNd同位体分析を行った. 著者達がNd同位体に注目した理由の1つには, Ndの核合成起源が関係している. Wanajo [27]は, ある条件下の重力崩壊型超新星爆発で起きるrプロセスでは, 質量数130以上(Ba以降)の元素は合成されない, というシミュレーション結果を示した. Ndの質量数は144程度なので, 重力崩壊型超新星爆発由来プレソーラー粒子がCC形成領域に混入したとしても, 形成領域のNd同位体比は乱されない. このことから, もしWorshamらの説のようにMo同位体二分性が重力崩壊型超新星爆発由来プレソーラー粒子の混入によって生まれたならば[21], 隕石全岩にNd同位体二分性が存在する可能性は低いと考えた.

しかし著者達の予想に反して, NC・CC間にはNd同位体二分性が存在した (図3). つまり, 元素によって同位体二分性を形成する原因は異なり, 重力崩壊型超新星爆発由来プレソーラー粒子以外にも, 二分性の原因となる物質を考える必要が出てきたのであ

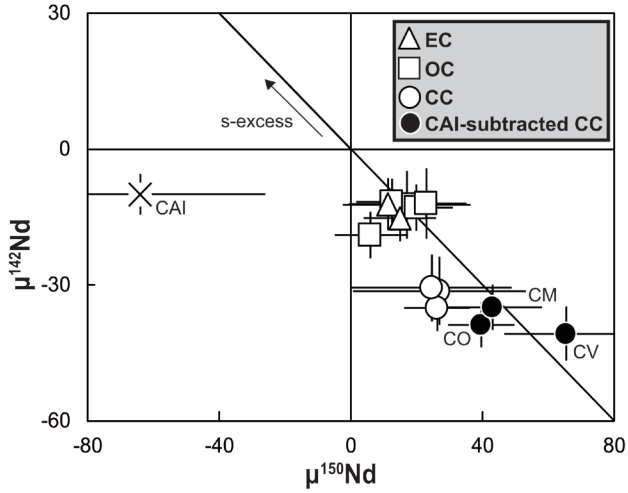

図3: 隕石全岩のμ142Nd−μ150Ndデータを示す図(EC・OC・CC: [26, 28], CAI: [25]). 原点を通る直線は, 地球組成とsプロセス端成分[5]との混合直線を示す. EC・OC・CC・CAIの誤差は分析結果の2 SD (two standard deviations)を示す. CAI-subtracted CCの誤差は, 分析結果の誤差を伝播させた2 SE (two standard errors)を示す.

る. それでは, Nd同位体二分性の原因となった物質はなんだろうか. 最も有力な候補は, コンドライト中に含まれるCAI (Calcium-aluminum-rich inclusions; 難揮発性包有物)であると考えられる[26, 29].

CAIは太陽近傍で凝縮したと考えられる高温凝縮物であり, 太陽系最古の年代を示すこと(4567 Ma: [30]), 隕石全岩よりも大きな同位体異常をもつこと[25]で知られている(図2-3). CAIが同位体異常をもつということは, CAI形成領域と地球にもまたプレソーラー粒子の時空間的不均質性があったということだが, その原因は本論文では議論せずNC・CCの違いにのみ着目する. CAIは, NC-groupにはほとんど含まれておらず, CC-groupには最大3%ほど含まれている[31]. Fukai and Yokoyama [26]は, 炭素質コンドライト全岩の同位体組成からCAIの同位体組成をマスバランス計算で取り除き, CAI-subtracted CCの同位体組成を計算した. 結果として, NC-groupとCAI-subtracted CCの同位体不均質性は, 二成分混合で説明できることがわかった(図3). CC-groupからCAIを取り除くことで, 同位体二分性に特徴的な組成のギャップは無くなったため, Nd同位体二分性の原因はCC形成領域に輸送されたCAIである可能性が高い. Ndをはじめとする親石性かつ難揮発性の元素(Ti, Srなど)は, CAI中の元素存在度が高いため, 同様のモデルで同位体二分性をおおむね説明することが出来る(Ti: [32], Sr: [28]).

それでは, Ndとは異なり親鉄性元素であるMo同位体二分性を, CAIの輸送によって説明することはできるのだろうか. Render et al. [22]によると,「CC-groupからCAIの寄与を取り除くと, NC-groupの同位体組成に近づく」という傾向はMo同位体にも見られる. しかし, CAIのMo存在度が比較的小さいことから, CAIを取り除いただけではNC・CCの同位体組成の差異は説明できない. 結論として, Mo同位体二分性は主に重力崩壊型超新星爆発由来プレソーラー粒子, Nd同位体二分性は主にCAI によって引き起こされたと考えるのが, 現状最も妥当と言えそうである.

3.3 NC-group・CC-group内の同位体不均質性

NC-group・CC-group間に見られる同位体二分性の原因についてここまで議論してきたが, それぞれのグループの中にも同位体不均質性は存在している(図1–4). ここからは, 各グループ内の同位体不均質性に関する研究例を紹介する.

NC-groupは, 数種類のコンドライトと分化隕石で構成されている. NC-group内で地球と最も良

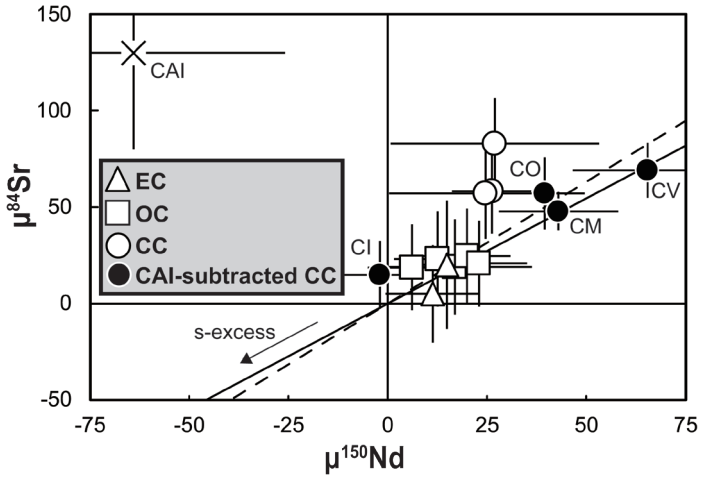

図4: 隕石全岩のμ84Sr−μ150Ndデータを示す図(EC･OC･CC: [26], CAI: [25]). 原点を通る直線は, 地球組成とsプロセス端成分 (太線: [36], 破線: [37])との混合直線を示す. EC･OC･CC･CAIの誤差は分析結果の2 SDを示す. CAI-subtracted CCの誤差は, 分析結果の誤差を伝播させた2 SEを示す.

い一致を見せる隕石種として，エンスタタイトコンドライト(Cr: [9])，IAB型鉄隕石(Mo: [21])が挙げられる．地球とこれらの隕石母天体は，おおむね同一の同位体リザバーで形成したと考えられている．一方で，NC-groupの中で比較的大きな同位体異常を示すのが，分化隕石の一種であるユレイライト隕石である(Cr: [9, 33]). Schiller et al. [34]は，NC-groupのCa同位体異常の大きさが各隕石母天体の質量に比例することを主張した．著者達は，質量が小さい天体(ユレイライト母天体)はCC-group由来物質の降着量が小さく，質量が大きくなるにつれ降着量が増すというモデルを提唱している．Yokoyama et al. [23]では，エンスタタイトコンドライト･普通コンドライト･ルムルチコンドライトにMo同位体不均質性を発見した．原因として，原始太陽系星雲で一部のプレソーラー粒子が中心星付近で起きた熱過程によって選択的に破壊され，ガスとして分離するモデルを提案した．もしくは，コンドライト毎のマトリックス存在量･Fe-Ni合金存在量の違いによっても，NC-groupのMo同位体不均質性が説明可能であるとしている．このようにNC-groupの同位体不均質性は元素によって見られる傾向が異なり，それらを現時点で統一的に説明できるモデルはない．

CC-groupは，化学組成･酸素同位体組成によって分類された8種類の炭素質コンドライトサブグループ(CV･CK･CM･CO･CB･CH･CR･CI)と，これらのグループに分類されない例外的な隕石(タギシュレイク隕石など)で構成されている．サブグループ間での同位体組成の違いはCr同位体で最も明瞭に示されている[9]. Sugiura and Fujiya [35]はコンドライト母天体の集積年代とCr同位体異常に相関関係があることを指摘し，Cr同位体異常の原因が原始太陽系星雲の時間的な組成変化であることを主張した．一方Fukai and Yokoyama [28]は，CV･CM･CO･CIコンドライトにSr･Nd同位体不均質性が存在することを示した(図4). Cr同位体比の結果と異なり，Sr･Nd同位体異常と集積年代の相関関係は得られなかった．そこで，Sr･Nd同位体不均質性を説明する新たなモデルとして，CC形成領域への粒子輸送モデルを提案した(図5). 小惑星と隕石の対応関係から，CV母天体は円盤の比較的内側，CM･CO母天体は円盤の比較的外側で形成したことが推察される[38]. CC-groupの母天体は全て木星以遠で形成されたとすると，CV母天体は木星付近で形成されたことになる．近年のシミュレーション結果から，木星形成領域のすぐ外側では，ガス圧力勾配のギャップが生じることによって比較的大きい粒子が濃集することが示されている[39]. 木星よりも内側の領域から輸送された(CC-group平均と異なる同

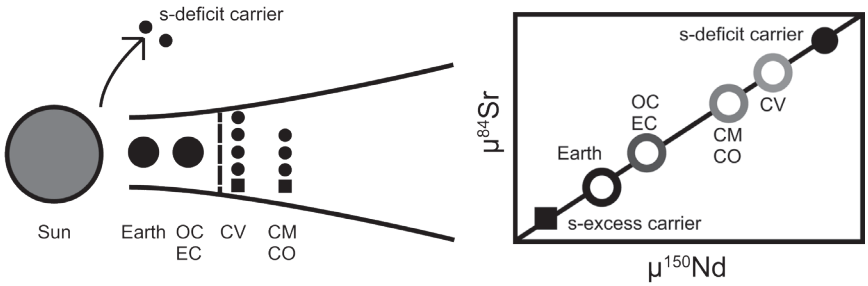

図5:Sr–Nd同位体不均質性を表す概念図([28]より一部改変).

位体組成の)粒子が，CV母天体付近に濃集することで，CM・CO母天体との差異を説明することができる．

しかしこのモデルは，CC-groupの中で最も太陽系の外側に由来すると考えられてきたCIコンドライトが，小さい同位体異常を示すことを上手く説明できない．CC-group間の不均質性はより複雑な機構を表している可能性があり，様々な元素の測定からより多角的に検証する必要がある．

4. 結論と今後の展望

隕石全岩のもつ核合成起源同位体異常は，初期太陽系に起きた様々な物理化学過程を表している．特に近年発見された同位体二分性は，隕石母天体が形成した時空間的な違いを明瞭に示している．炭素質コンドライトに代表されるCC-groupの形成領域と，エンスタタイトコンドライト・普通コンドライトなどのNC-groupの形成領域は，木星コアによって空間的に分断されていたというのが有力な説である．

NC-group内，CC-group内に見られる同位体不均質性の原因を明らかにすることも重要である．NC-groupの同位体不均質性は，熱過程によるプレソーラー粒子の破壊や，マトリックス・Fe-Ni合金の含有量の違いによって引き起こされた可能性がある．CC-groupの同位体不均質性は，母天体の集積年代の違いや，NC形成領域から輸送された粒子の不均質分布によって引き起こされた可能性がある．

このように，隕石全岩の同位体異常の原因を解釈する際，隕石母天体の「空間的な」分布・「時間的な」分布を軸に議論が進められてきた．しかし，隕石母天体の「空間的な」分布というのは，小惑星と隕石の対応関係をある程度仮定した上で得られる，間接的な証拠である．隕石と小惑星表面の反射スペクトルが完全に一致する例は少ないことからも，隕石が由来する場所の情報に欠ける標本なのは間違いない．一方で，はやぶさ2やOSIRIS-RExのサンプルリターン探査は，直接リモートセンシング探査をした小惑星から岩石試料を入手し，対応した化学情報を実験室環境で得ることができる．この方法により，小惑星の空間分布に加え，小惑星の宇宙風化などの影響も考慮することができ，より精密な議論ができることが期待される．そのためにも，我々が手にしている隕石試料を用いた信頼できる宇宙化学データベースの構築や，微小量サンプルからできる限り多くの情報を引き出すスキームの確立などが，今後不可欠になるだろう．

謝 辞

本論文の執筆を勧めてくださった瀧川晶博士，丁寧にコメントをして頂いた査読者の飯塚毅博士に厚

く御礼申し上げます．本論文の議論やデータの大部分は，東京工業大学地球惑星科学系にて提出した自身の博士論文をもとにしています．当時の指導教員である横山哲也博士をはじめ，ご指導頂いた臼井寛裕博士，羽場麻希子博士らに深く感謝致します．

引用文献

[1] Hayashi, C., 1981, Prog. Theor. Phys. Sup. 70, 35.
[2] Scott, E. R. D. and Krot, A. N., 2014, Treatise Geochem. 2nd edition vol. 1, 65.
[3] Zinner, E., 2014, Treatise Geochem. 2nd edition vol. 1, 181.
[4] Fischer-Gödde, M. and Kleine, T., 2017, Nature 541, 525.
[5] Arlandini, C. et al., 1999, Astrophys. J. 525, 886.
[6] Dauphas, N. et al., 2010, Astrophys. J. 720, 1577.
[7] Qin, L. et al., 2011, Geochim. Cosmochim. Acta, 75, 629.
[8] Dauphas, N. et al., 2002, Astrophys. J. 565, 640.
[9] Trinquier, A. et al., 2007, Astrophys. J. 655, 1179.
[10] Warren, P. H., 2011, Earth Planet. Sci. Lett. 311, 93.
[11] Shukolyukov, A. and Lugmair, G. W., 2006, Earth Planet. Sci. Lett. 250, 200.
[12] Qin, L. et al., 2010, Geochim. Cosmochim. Acta 74, 1122.
[13] Larsen, K. K. et al., 2011, Astrophys. J. Lett. 735, L37.
[14] Hibiya, Y. et al., 2018, Geostand. and Geoanalytical Res. 43, 133.
[15] Mougel, B. et al., 2018, Earth Planet. Sci. Lett. 481, 1.
[16] Leya, I. et al., 2008, Earth Planet. Sci. Lett. 266, 233.
[17] Trinquier, A. et al., 2009, Science 324, 374.
[18] Zhang, J. et al., 2012, Nat. Geosci. 5, 251.
[19] Budde, G. et al., 2016, Earth Planet. Sci. Lett. 454, 293.
[20] Kruijer, T. S. et al., 2017, Proc. of the National Academy of Sci. 114, 26.
[21] Worsham, E. A. et al., 2017, Earth Planet. Sci. Lett. 467, 157.
[22] Render, J. et al., 2017, Geochem. Perspec. Lett. 3, 170.
[23] Yokoyama, T. et al., 2019, Astrophys. J. 883, 62.
[24] Budde, G. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 736.
[25] Brennecka, G. A. et al., 2013, Proc. Nati. Acad. Sci. 110, 43.
[26] Fukai, R. and Yokoyama, T., 2017, Earth Planet. Sci. Lett. 474, 206.
[27] Wanajo, S., 2013, Astrophys. J. Lett. 770, L22.
[28] Fukai, R. and Yokoyama, T., 2019, Astrophys. J. 879, 79.
[29] Burkhardt, C. et al., 2016, Nature 537, 394.
[30] Connelly, J. N. et al., 2012, Science 338, 651.
[31] Hezel, D. C. et al., 2008, Meteorit. Planet. Sci. 43 (11), 1879.
[32] Gerber, S. et al., 2017, Astrophys. J. Lett. 841, L17.
[33] Yamakawa, A. et al., 2010, Astrophys. J. 720, 150.
[34] Schiller, M. et al., 2018, Nature 555, 507.
[35] Sugiura, N. and Fujiya, W., 2014, Meteorit. Planet. Sci. 49 (5), 772.
[36] Qin, L. et al., 2011, Geochim. Cosmochim. Acta 75, 7806.
[37] Hoppe, P. and Ott, U., 1997, AIP Conf. Proc. 402, 27.
[38] Burbine, T. H., 2014, Treatise Geochem. 2nd edition vol. 2, 366.
[39] Desch, S. J. et al., 2018, Astrophys. J. Sup. 238, 11.