

■ 凡例

- ... 大見出し (スライドタイトルに対応)
- ... 塚本さんのレクチャー内容, 回答 etc.
- ? ... 質問
- + ... ノート系の付けた補注

■ 目次

- 隕石について
- 年代学
- 組織学
- 同位体顕微鏡
- 酸素同位体異常
- プレソーラー粒子

■ 自己紹介

- 塚本流研究の進め方
 - 欧米のスタイルと対照的, 日本的
 - 先に設計図ありきではなく, 細部を詰めていくことで全体像を得る
 - 日本のアニメ (宮崎駿の映画) 制作手法と同じ
 - 理論家の思考回路と逆
 - + cf., "chondrite 母天体" の項目の隕石は普遍性に関する議論
 - 生い立ち
 - 和歌山御坊市出身, 田舎育ち
 - 勉強してなかったため, 推薦のある筑波大へ
 - 実験が一番嫌いだった
 - 物理・化学実験を一度も履修していない
 - 隕石薄片の見方に関して ... "分かる" とはどういうことか ?
 - 岩石薄片の顕微鏡による観察, フィールド調査
 - "これは○○である" ということは証明出来ない
 - "すでに証明されたものがこれである" と説明することのみ可能
 - 科学とは説明出来るものしか説明出来ないもの
 - 未知のものをなんとか説明のつくように考えること, その方法について話す

■ 隕石について

- 太陽系最古の天体の破片 : 隕石
 - 各天体の年齢 (岩石)
 - 地球 : 現在 ~ 4.1 Gyr
 - 現在では最古の近くの年齢は 4.4 Gyr まで更新
 - + ジャック・ヒルズ変成岩中のジルコン
 - 火星 : 1 ~ 4.3 (SNC 隕石)
 - 月 : 3 ~ 4.5
 - 隕石 : 4.5 ~ 4.6 (図で尾を引いているのは
形成後のインパクト加熱による)
 - 従来は, コンドライト (< 100 km) のほうが
エイコンドライト (< 500 km) より古いとされている

- 天体が次第に成長して行ったことを示す
- 原始惑星の破片：エイコンドライト、鉄隕石、石鉄隕石
 - 代表例：小惑星 Vesta
 - 金属のコア，岩石のマントルという構造を持つ分化した天体
 - 分化した天体に対応する隕石
 - 鉄隕石：Fe-Ni 合金，コア
 - 石鉄隕石：鉄とかんらん石の粒，コア-マントル境界に対応
 - エコンドライト：地球の火山岩に対応
(白色なのはインパクトで粉碎されたことにより，光を乱反射するため)
- ? 石鉄隕石はどうやって出来るか
 - 母天体が小さく重力が小さければ，鉄が沈降せずにかんらん石と分離しない
 - 地球上で作ろうとしてもすぐに分離
- ? 石鉄隕石のかんらん石の粒が大きいのはなぜか
 - マグマの中で結晶成長したため
- ? なぜかんらん石と鉄が混ざっているのか
 - 形成後インパクトなどで攪拌された可能性
 - 割れたかんらん石が見つかる，結晶化後そのままの状態を保っていない
 - + "重力が小さいため分離しない" という議論との関係は？
- ? 全ての分化隕石が Vesta からのものか
 - 石鉄隕石は十数種類に分類され，それぞれ異なる母天体からと考えられる
- ? 石鉄隕石の鉄とかんらん石の間で元素交換されているか，平衡か
 - Ni は鉄・かんらん石の両方に取り込まれるが，平衡
 - 地球のコアとマントルではむしろ平衡になっていない
- 微惑星の破片：コンドライト
 - 例：イトカワ (type LL5 に対応か)
 - 分化していない天体
 - コンドライトの代表例：
 - Allende
 - 総質量 2 t
 - Murchison
 - アミノ酸の発見
 - どちらも 1969 年に落下，同年のアポロ計画とともに惑星科学にとって極めて重要な年となった
 - 組織的特徴から
 - コンドリュール，周囲の細粒鉱物 (マトリックス) の存在
 - それぞれの構成物は形成時に融けていたが，集積後母天体上で融解していない
 - コンドリュール中のガラスが外部のマトリックスに影響を与えておらず，組成的なギャップがある
- ? どれがどの鉱物か分かるか

- 化学組成と結晶構造が分らないと本当は分らない
 - spinel はかんらん石と同じ化学組成を持つ異なる鉱物
 - 逆に化学組成が異なっても同じ鉱物となることもある

? 鉱物の見分け方 (日本各地のお姉さんに例えると)

- 大阪 (きらびやか) : かんらん石
- 東京 (質素) : 斜長石
- 名古屋 (中間的) : 輝石
- cf., 地質における "典型的な" 路頭
 - 一般的でない, ということ
 - よく分かるものはそうそうない

□ 温泉の証拠

- コンドライトも母天体上の活動の影響を受けている
- 組織から
 - olivine の周りの白いもの
 - 同じ olivine だが, 鉄・結晶の大きさが大きく異なる
 - 結晶の境界部が溶けて新しい鉱物が析出, 間を埋めた
 - コンドリュールの外側に近い部分ほど変成の影響が顕著
 - 水溶液から析出した鉱物と考えるのが妥当
 - 母天体中に温泉が存在, 岩石中を染み渡って変成
- 46 億年間変成を受けずに生き残る物は非常に少ない
 - 変成の効果を差し引かないと形成当時の状態を復元できない

? 地球上での変成ではないか

- fall なら自明 (Allende)
- 元素 (Mg, Fe) の結晶中での拡散から, 変成時の温度を推定可能
 - 地表の気温では 46 億年かけてもほとんど拡散しない
- マトリックス
 - 1 μm から数十 nm の結晶の集まり
 - 隣り合う粒の形成場所が場合によっては数十光年も離れていた, というようなことも分かる
- コンドライトは様々な時代に出来た物質の集合
 - 変成により出来た物質
 - 太陽系星雲で出来た物質
 - 分子雲中で出来た物質
 - AGB, SN などで出来た物質

□ 隕石の分類

- 分化した隕石
 - 母天体上で融解, 元素分別を経験 (特に金属-珪酸塩間)
 - コア-マントル構造を持つ母天体から
- 始源的隕石
 - 大規模融解を経験していない
 - 変成は受けているが, 元素の移動が顕微鏡サイズ
 - 始源的の意味化学組成が太陽大気の組成に等しい, という意味

- 鉱物学的な変成無し，年代的に古いということは意味しない

? CI は極度の水質変質を受けているが，始源的隕石か

- CI では数 m 元素が移動，よく均質化
- 鉱物学的な変成は受けているが，上の "始源的" の定義から始源的隕石に分類される

- 化学組成，岩石組織，酸素同位体組成を用いて分類

□ 分化した隕石

- 大分類
 - エイコンドライト：マントル，地殻
 - 石鉄隕石：コア-マントル境界
 - 鉄隕石：コア
- 細分類
 - 母天体の違いだと考えられる
 - 南極隕石などはまだ分類が追いついていない

□ HED 隕石

- 共通の分化した母天体からのものと判明
 - Howardite が Eucrite と Diogenite のポリミクトインパクトブレッチャであるため
 - Eucrite：火成岩（玄武岩 or ハンレイ岩）
 - Diogenite：火成岩（輝石の集積岩）
 - Howardite：角礫岩（地球では，地滑りで砕けた岩石が再集積したもの）
ショック変成を受けた形跡もあることから，
Eucrite と Diogenite が母天体上に存在，
他の小天体との衝突時にクレーター噴出物として形成

? Howardite がなければ Eucrite と Diogenite は別の母天体起源だとされたか

- だから元々 3 つに分類されていた

? 母天体という概念について

- "ある隕石タイプに対応する母天体" は必ずしも 1 つの小天体を表さない
 - 複数存在する可能性もあるが，この場合ある隕石タイプが本当に共通の小天体起源であるかどうかは判別不可能
- 隕石の分類と同じ階層

□ Irons

- ウィッドマンステッテン構造の起源
 - 鉄のメルトが冷えてくると，~1500 °C で全て均質な taenite に
 - ~900 °C まで冷えると taenite 中に kamacite（板状部分）が析出，
taenite は板の間の部分に残される
+ kamacite の結晶は板状，taenite の特定の格子面に平行に成長するため
 - ~10 K/Myr 程度の非常に遅い冷却速度で形成
 - 筋の幅は冷却速度が遅いほど広い
- Ni 濃度
 - taenite は kamacite に比べ Ni に富む
 - taenite 中で Ni 濃度は M 字パターンを示す
 - kamacite から taenite へ Ni が拡散した証拠

- + taenite 中では Ni の移動が遅いため、境界に Ni が溜まる
- + このパターンから Ni の移動速度が見積もられ、そこからさらに冷却速度が見積もられる
- M 字パターンを細かく見ると、Ni 濃度は櫛状
 - より低温でさらに新しい鉱物が析出するため
 - これを利用すると、様々な温度の時点での冷却速度を知ることが可能
 - 低温時に急冷された証拠が見つかる
 - 小天体との衝突時に鉄のコアが飛び出したモデル

- 形成場所
 - ~100 km の天体の中心部
 - 岩石のマントルが保温することにより冷却が抑制

- ? 櫛状パターンは最近発見されたか
- 昔から知られていた

□ Stony-Irons

- Pallasite
 - 鉄隕石と同様、100 km 程度の天体から
 - 鉄部分にはウィッドマンステッテン構造
- Mesosiderite
 - 珪酸塩はマグマから結晶したもののように見える
 - 起源は不明
 - エイコンドライトとコンドライトの衝突 ?

□ 分化した隕石の母天体

- 地殻、マグマオーシャン、マントル、コア

? 外が熱い図になっているが

- Wood は衝突を熱源に考えているため
- 放射性元素を熱源として考える場合は内側ほど熱くなる

? 小天体のインパクトでマグマオーシャンは作れるか、むしろ破壊されないか

- 確かにその通り、今後の課題

? インパクトでマグマオーシャンを作るには天体が大きい方が有利だが、その場合石鉄隕石を分離させずに形成可能か

- 確かにその通り、今後の課題
- ²⁶Al などの放射性元素熱源のほうが良いかも
- コア-マントル境界だと考えれば分離の問題は解決するかもしれないが、その割には石鉄隕石の数が多すぎる
 - 一方、マントルに対応するエイコンドライトはなぜか少ない

□ How many parent bodies?

- 元々は化学組成で（結晶分化作用で一方から他方を形成できるか）

- 近年は酸素同位体組成が重要
 - 物理的因果関係はない

□ 酸素

- 隕石の分析に酸素を用いる利点

- 豊富な存在度 (石質隕石の 50 %)
 - 3 つの安定同位体
 - 分別と混合を判別可能
 - ある隕石が, 別の隕石が分化することにより形成されたならば, 三酸素同位体図上で共通の傾き $1/2$ の線上に乗る
 - 各隕石タイプはだいたいそれぞれ異なる傾き $1/2$ の線上に乗る
 - 異なるタイプの隕石でも同一直線上に乗るものは同一起源
 - SNC 隕石 ... 火星起源
 - HED 隕石 ... Vesta 起源
 - 同じタイプなのにばらつくもの
 - 複数の母天体というよりは, 均一化が十分に進んでいない母天体起源
- ？ プロットされているのは何か
- 隕石毎の全岩組成
- ？ 異なるタイプの隕石が共通の母天体起源である可能性は酸素同位体組成から簡単に判断出来ないか？
- 母天体全体で酸素同位体組成が均質化されれば (大規模なマグマオーシャンが形成されれば) 可能だが, 複数の小さなマグマポンドからの形成の場合, 元々の組成が異なれば異なって見える
- ？ 鉄隕石とエイコンドライトでも酸素同位体組成が同じものは同一母天体か
- 例えばパラサイトと HED は同一直線上, 共通の母天体のコアとマンツルの可能性がある
- ？ 上部マントルと下部マントルでは酸素同位体組成がわずかに異なる可能性がある (分化後に late veneer により上部マントルの組成が変わる) が, それは技術的に測定可能か
- 火星隕石中の降雨起源の水の痕跡と岩石とで酸素同位体組成が異なる例あり, late veneer や大気中での光化学反応が寄与した可能性がある
- ？ なぜ SNC 隕石が火星隕石だと分かるか
- 年代 (1.3 Gyr) が若いため, 大きな母天体が必要
 - 隕石中の希ガス組成が viking の火星大気組成測定とよく一致
 - 月隕石はサンプルを直接採取してきており, それと比較できるため信頼度が高い
- ？ なぜ鉄隕石の酸素同位体組成が分かるか
- なぜか鉄隕石中にわずかにシリケートが存在するため
- ？ どんな物理・化学過程でも傾き $1/2$ の直線上に乗るか
- 原子間の結合の強さが質量依存するため, 原則的に傾き $1/2$ の直線に
 - 一部非質量依存分別を起こす過程もある
 - 酸素以外の元素も同様に分別
 - 地球と隕石の間に Si の分別, コア形成のため？
- ？ なぜ酸素を利用するのか
- なぜか酸素には傾き $1/2$ でない直線上に乗るものがあるから

- 豊富な存在度などはどちらかと言えば 2 次的な理由

□ Lunar

- 左 : 高地から, 斜長岩などからなるブレッチャ
- 右 : 海から, 玄武岩

□ Chondrite の反射電子像

- 構成成分
 - コンドリュール
 - マトリックス
 - CAI, AOA
- 全体として一度融解・均質化してから形成するのは難しい
 - コンドリュールの形成温度 : ~2000 K
 - マトリックス中の粘土鉱物, アミノ酸 : 低温下でのみ形成
- 個々の成分は星雲中で形成, その後母天体に集積
 - 変成は受けているが, 火成活動は起きていない

□ Matrix

- 主成分
 - 珪酸塩 (無水, 含水)
 - 金属鉄
 - 硫化鉄
 - 反射電子像では明暗は電子の反射能により決まる, 重い元素 (特に Fe) を含む部分は白く写る
- 副成分
 - グラファイト
 - 有機物
 - 酸化物
 - プレソーラー粒子
 - new-PCP
- 変成の効果
 - Murchison (CM2, 水質変成)
 - 粘土化, 結晶が無くなったためぼやけた画像に
 - Allende (CV3, 熱変成)
 - 結晶成長, 粗粒化
 - マトリックスは非常に変成を受けやすい

? 元々の粒子サイズはどれくらいか

- Allende で 1 μm , より始源的な Vigarano で ~200 nm 程度
- 元々は 100 nm 位
 - + よくいわれている星間塵のサイズ (sub- μm) と合致

□ Chondrule

- 構造
 - 内部 : 晶出鉱物
 - 組織は棒状, 斑状, etc.
 - 外部 : メソスタシス (ガラス)
 - メルトの急冷により形成されたことを示唆

- サイズ : 0.1-1 mm, まれに 5 mm のものもある
- + 大きなものは CB (衝突起源 ?) によく見られる

- 成分
 - 珪酸塩
 - 金属鉄
 - 硫化鉄

? サイズは半径か直径か

- + 2 倍のサイズ差は円盤中での運動やダスト成長の理論と付き合わせる際に結構影響するため
- Yes

? マトリックスを材料にしてコンドリュールを形成できるか

- 永原さん, 土山さんの結果によると Yes

□ Refractory Inclusions

- Ca-Al-rich inclusion (CAI)
 - 難揮発性元素である Ca, Al に富む
 - 存在度は Mg, Si, Fe に次ぐ (1/10 程度)
 - サイズ : 10 μm (気相からの凝縮) から 2 cm (メルトの固化)
 - 成分
 - 酸化物
 - 珪酸塩 (コンドリュール中のものとは異なる鉱物)
 - 金属鉄
 - 硫化物
 - CAI 形成温度よりも低温で凝縮, 温度が下がったのちに金属鉄が硫化鉄に変化したと考えられている
- amoeboid olivine aggregate (AOA)
 - コンドリュールと CAI の中間的物質
 - サイズ : 10 μm から 1 cm
 - 気相からの凝縮
 - 個々の結晶はコンドリュールよりも小さい
 - 球形でなくアメーバ状, fluffy
 - 成分
 - olivine
 - Ca-Al 珪酸塩
 - 金属鉄
 - 硫化物

? AOA は直接凝縮のみで 1 cm まで成長したということか

- マトリックスが後から入ってきていないことから, Yes
- 確かに 1 μm の結晶が 1 cm まで集まっているのは不思議, 形成機構はいまだ不明
- + 微結晶の付着成長の可能性は ?

? CAI と AOA を区別する理由は意味はあるか

- あまりない, 歴史的な区別

□ 太陽系存在度における鉱物晶出温度

- 凝縮順
 - 2000 K では全て気相 @ 10^{-4} bar
 - アルミナ (1700 K), ペロブスカイト (1600 K), メリライト (1500 K), かんらん石 (1350 K), 輝石 (1300 K), 斜長石 (1200 K), Fe の酸化 (750 K), 硫化鉄 (650 K), 含水鉱物 (300 K)
- コンドライトの構成成分の形成温度
 - CAI, AOA : 1300 K 以上で凝縮したものを集める
 - コンドリュール : 600 K 以上で凝縮したものを集める
 - FeS が元々含まれているため
 - 形成時の最高到達温度は 2000 K, S が揮発するよりも速く急冷する必要あり
 - マトリックス : もっと低温のものを集める
- Chondrite classification
 - コンドライトのタイプ
 - 全岩組成による分類
 - タイプ毎に構成成分の含有量が異なることに起因
 - 大きく分けると 3 種類 (O, E, C)
- O chondrites
 - Fe の量で細分類
 - H (Hi-Fe), L (Low-Fe), LL (Low-Fe, Low-metal)
 - + cf., UC-diagram
 - 全体は閉鎖系に近かった#
- E chondrites
 - かんらん石無, ほぼ輝石 (enstatite)
 - Fe は全て metal or 硫化物
 - Mg:Si ~ 1:1 だから, Mg_2SiO_4 (Mg:Si = 2:1) ではなくて $MgSiO_3$ (Mg:Si = 1:1) が出るのが自然
 - 組織がぐちゃぐちゃしているのは角礫化のため
- C chondrites
 - たくさんの細分類
 - 全体的に O type に比べマトリックス (黒い部分, 細粒のため光を通さない) が多い
 - CI
 - もっとも始源的 (太陽組成に近い)
 - CH
 - 黒い部分はマトリックスではなく metal
 - 特殊なコンドライト, 衝突起源 ?
- How many parent bodies?
 - 酸素同位体による分類でも, タイプ毎に異なる
 - それぞれ異なる母天体起源

- C コンドライトはタイプ毎の広がり大きい、規則的に見える
- ? コンドライトの母天体のサイズはどれくらいか、イトカワくらいか
 - 10 km 程度、イトカワはその破片
 - + 熱変成を受けたコンドライトから、母天体サイズの下限が求まる
- ? 母天体上で大規模融解などの均一化過程がなかったとすると、なぜ酸素同位体組成や化学組成がタイプ毎に一様なのか
 - 組成の似た材料のみを集めて母天体を作ったと考えるしかないが、なぜそのようなことが起きたかは不明
- ? 全岩組成の分析にはどれくらいの量のサンプルを用いるか
 - 昔 (1990 年以前) は指先くらい
 - CV のばらつきの解釈
 - 酸素同位体異常の大きな CAI, AOA が多数含まれており、指先大のサンプル中に CAI がどれくらい含まれるに同位体組成が大きく左右されている可能性
 - 0 ではコンドリュールが大部分を占めるが、コンドリュールは元々酸素同位体組成のばらつきが小さいためこのような問題は起こらない

□ Metermorphism in asteroid

- 岩石学的タイプ
 - 化学組成は同じだが、加熱により組織 (鉱物) が変成を受けた結果
 - type 3 : < 400 K
 - 6 : ~ 1200 K で数百万年間
 - 結晶成長 (粗粒化) が進むのは表面エネルギーを減らすため
 - 元素は 100 μm 程度移動

- ? H の type 6 が 6 っぽくないが
 - よくわからない

- ? E の type 4, 5, 6 は無いか
 - 4, 5 はある (6 は不明)

- ? なぜ難揮発性物質が集まって CAI が形成されるか
 - 母天体上で形成されるわけではないことに注意
 - 円盤中で形成後、母天体に集積

- ? 普通コンドライトは何が普通なのか、命名法が分かりにくい
 - 単純に数が多いから
 - 元々は Mg# によって対応する鉱物名 (ハイパーシン, ブロンザイト, etc.) が付いており、E コンドライトと同じ階層の命名法だった

- ? type 6 でのコンドリュールの見分け方
 - コンドリュール内外の粒径の違いから

□ 変成作用による Fe/Mg 比の均一化

- 非平衡コンドライト中のコンドリュールの反射電子像
 - 暗 : Mg 少, 明 : Mg 多
 - + 逆 ? Fe が多いほど明るくなるのでは ?

- Fe/Mg 比
 - type 3 では個々のコンドリュールの多様な形成条件を反映して Fe/Mg 比が大きくばらつく
 - 岩石学的タイプが大きくなるにつればらつきが小さくなる
 - 元素拡散による均質化

- ？ 組成の均質化はマトリックスのみか，粗粒化との関係は
- どちらもコンドライト全体で起こる
 - コンドリュールで結晶成長が目立たないのは 結晶サイズが元々大きいため

□ 変成作用による粗粒化

- マトリックスが粗粒化し透明に
 - 黒く残っているのは metal
- 粗粒化は酸素の移動が律速

□ Alteration in asteroid

- type 1, 2 : < 400 K での水質変成の度合い
 - 粘土化，細粒化
- CI (type 1)
 - おそらく元々はコンドリュールを含んでいたが，極度に粘土化が進み消滅
- 他のコンドライトで水質変成が進まなかった理由
 - C コンドライトの母天体に比べ高温だったため，H₂O が宇宙空間へ揮発

□ 水質変成

- ？ 水質変成したものを再度加熱するとどうなるか
- まず脱水が起こり，その後 type 4 以降と同様粗粒化するはず
 - CV の中に粘土鉱物が再度 olivine に戻る途中の例が存在

- ？ type 6 の先はどうなるか，融解するか
- 対応する隕石は発見されていない
 - 融解は起きたが地球に落下していないのか，融解するほど温度が上がらなかったのかは不明

- ？ C コンドライトを煮炊きすることで他のコンドライトを形成できるか
- 難揮発性成分の組成も異なるため，不可能

- ？ 水質変成の度合いは何が決めるか
- H₂O の量，変成温度

□ 未変成未変質？

- "type 3 は未変成" といわれるが，ミクロスケールで見ると多かれ少なかれ（熱的な）変成を受けている
 - プレソーラー粒子 (0.1 μm) の濃度が減少
 - 組織（結晶サイズ）の変化
 - Acfer 094 (最も pristine?)

- アモルファス状，個々の結晶は判別不可
但し，大きな粒はコンドリュールの欠片 or FeS（白色）
- 含水鉱物無，アモルファスに保たれている点から，
水質変成，熱変成のどちらもあまり受けていないと考えられる
- 他の type 3 では画像で見える粒と同程度のスケールの結晶

? Acfer 094 でも変成を受けているか

- 厳密には未変成のものは存在しない

? なぜ粒子同士が付着したままで崩れないか

- 真空中では鉱物表面が活性化されるため付着可能かもしれない
- 粒径が小さければ分子間力や表面エネルギーで付着可能
(サイズが小さいうちは結合に寄与する原子の割合が大きいため)，
1 mm は無理，100 nm だったら OK

? 小さいうちはよいが隕石や母天体サイズになっても付着するか，
変成作用が "糊" の役割を果たしたのではないか

- 変成作用を起こすためには集積しないとだめなので本末転倒
- fluffy な状態で集積したものが後で圧密されて固まった？

? 水質変成のタイムスケールは

- 温度の不定性によりよく分かっていないが 1 Myr 程度
+ 元素の移動速度が温度に強く依存するため？

□ Chondrite 母天体

- 熱変成度の多様性の起源
 - 内部熱源 (26Al) の存在により，母天体中心部ほど熱が逃げず高温
 - 表面付近が type 3，中心に近いほど岩石学的タイプ大
 - 数 km サイズの天体だと中心温度が type 6 の変成温度になる
 - その後の衝突により rubble pile 化？

? 例えば type 3 だけから成る母天体があった可能性はないか

- それは否定出来ないが，単純さの面で劣る

? 図で，例えば type 5 と 6 の境界に対応する隕石はあるか

- ある，分類屋さんの頭を悩ませている

? 例えば type 3 と 6 が混じったような隕石はあるか

- 角礫化により混ざったものがたまに見つかる

? 圧力の効果は

- 数 km の天体では鉱物の結晶構造にほとんど影響を与えない

? 水質変成の場合はどういう configuration になるか

- 熱変成，水質変成のどちらの場合も初めは全ての type 3 + H₂O ice
 - 全ての type 3 に H₂O の形跡あり
 - 反応する前に H₂O が飛ぶほど温度が上がれば熱変成
 - 内側ほど水質変成大？

? type 6 変成に要するサイズより大きな母天体も当然存在したはずで，
その場合中心では融解により分化隕石が出来るのではないか

type 6 の変成温度が融解ぎりぎりなのは本質的なのではないか

- 半分融解した type 6 が存在

? このとき、なぜ分化隕石と始源的隕石の混合物が見つからないのか
隕石が普遍的であるとして落ちてきたもののみで原始太陽系について
議論する一方で、都合が悪くなると "落ちてきてないだけ" と
逃げるのはずるいのではないか

- 本流の理論ではコンドライトに普遍性を要求していない
(コンドライトが現存している以上、これらの性質は理論が
満たすべき必要条件であり、この論理にコンドライトの
普遍性は要求されない)
ので、論理破綻してはいない

□ 隕石の割合

- コンドライト : 分化隕石 ~ 8 : 2

- コンドライト

- 0 が 9 割

- C では水質変成を受けたもの (CM) が多い

何故か find と fall でサブタイプの個数分布が大きく異なる

- 分化隕石

- find のエコンドライトが少ないのは風化により地球の岩石と
見分けがつかなくなるため

? 南極隕石なら風化してもエコンドライトだと分かるのでは

- そうかもしれない

? 個数でなく質量に直したら図の内容は変わるか、

例えばタイプ毎の強度の違いなども反映してしまっていないか

- そうかもしれないが、誰も調べたことがないので分からない

? たった 3 つの母天体由来なのに 0 type の数が圧倒的に多いことは、
地球に落下するサンプルのタイプ別個数分布が太陽系全体の分布を
代表していないことを示しているのではないか

- 0 type の母天体であると考えられる S 型小惑星は少数、

よってなぜ 0 type がたくさん落ちてくるのかはよくわからない

- このことは地球に落ちる隕石の分布が必ずしも太陽系を代表しない
ことを示すが、隕石の普遍性を要請していないので論理的に
問題ないとする

□ 隕石の軌道

- 逆に辿ると小惑星帯に

- 図は全て 0 コンドライトの軌道

□ 小惑星の反射スペクトル

- 図は既知の隕石とよく対応するものだけ

- C : C コンドライト

- S : 0 コンドライト or mesosiderite

- V : eucrite

□ 小惑星タイプの動径分布

- C 型が非常に多い
- D 型は C コンドライトよりも始源的？

□ Chondrite の特徴

- コンドライトタイプ毎に全岩化学組成は大きくばらついて然るべき
- コンドライトは様々な時代・条件下で形成された物質の集合体
- 構成物質（コンドリュール, CAI, マトリックス）の占める割合はタイプ毎に大きく異なる
- 実際は

□ Chondrite の化学組成比較 I

- CI の揮発性成分を除けば, シリケート & metal, C, FeS の割合は全タイプ共通

? シリケートと metal を合わせて描いた気持ちは何か

- 次のスライド参照

□ Chondrite の化学組成比較 II

- シリケート & metal の部分を元素別にした図
- タイプ間の差はかなり小さい
- 要するにタイプの違いは鉱物の違い
- 鉱物の形成条件が違ったことに起因
- でも材料物質はほぼ同じ
- このような古典的な化学分析は現在誰も行えなくなった

□ U-C diagram

- Fe の総量及び酸化還元状態をタイプ毎にプロット
- 横軸 : FeO
- 縦軸 : Fe metal + FeS
- Fe の総量はほぼ一定 (傾き -1 の線上に乗る), 酸化還元状態のみ異なる
- 還元的 E H L LL C 酸化的

□ Chondrite の組成

- 幾つかの例外を除いて CI と太陽光球 (の非揮発性元素) の組成は非常によく一致
- Li : 核反応による分解#
- In, Lu, Th : 光球組成の分析精度の問題 ?

? Genesis で太陽組成の分析精度は改善されなかったか

- 地表に衝突した際のコンタミが大きく, データは出ていない

? 変成の影響が小さい type 3 よりも type 1 のほうが

太陽組成に近いのはなぜか

- type 3 は元々太陽組成に比べ揮発性元素に乏しかった
- type 1 の母天体は H₂O が凝縮できるほど低温環境にいたため, 比較的揮発性の高い元素 (K や Zn, 次のスライド参照)

も取り込めた

- タイプ毎の元素組成 (CI で規格化)
 - 図の見方
 - 上段 : C コンドライト
 - 下段 : O, E コンドライト
 - 左列 : 親石元素を凝縮温度順に並べたもの
(1800 K (Al) から 1000 K (K))
 - 右列 : 親鉄元素を凝縮温度順に並べたもの
(1800 K (Os) から 600 K (Za))
 - 味わい方
 - 揮発性の高い元素ほど CI に比べ欠乏
 - 左下 (O, E コンドライト中の親石元素) のみこのパターンからずれる
- Chondrite (ここまでのまとめ)
 - 矛盾的関係の内在
 - 種々の温度 (2000 K ~ 200 K) で形成した物質の機械的集合体
 - にも関わらず化学組成はほぼ一定
 - 高温の星雲ガスの冷却と 2 成分混合でおおよそ説明可能
 - + 所謂高温凝縮モデル ?
 - しかし, 高温の星雲ガスの天文学的証拠は無い
 - + 太陽系全体をガス化するのはまず不可能
 - 隕石中の酸素同位体不均質, プレソーラー粒子の存在も否定的材料
 - + 太陽系全体がガス化すれば同位体異常は均質化されるはず
- 定常降着円盤の温度分布
 - 固体物質の完全蒸発は限られた領域のみ
 - 1 AU で 1000 K 程度
- 化学反応と機械的混合の混在
 - マトリックス中で隣合う鉱物が全く異なる環境で形成された例
 - new-PCP : 木星付近で形成
 - CAI : 水星より内側で形成
 - これら 2 つの過程の影響を混在させたまま議論を進めると, コンドライト物質の起源を見誤ってしまう可能性あり
 - + 例えば, new-PCP と CAI が共通の環境下における化学反応により形成されたと考えてはいけない
- Chondrites 料理法の哲学
 - コンドライトの成因を正しく理解するためには, 機械的混合過程と化学反応過程を区別して考えることが必要
 - コンドライトの各構成物質は種々の環境下で形成
 - 揮発性成分を除き化学組成がほぼ一定になるように混合
 - + new-PCP, CAI それぞれの分析からそれぞれの形成環境が分かり, 2 つの物質の混ざり方から円盤内の混合過程が分かる
 - 以下, しばらく化学反応過程の話

□ 宇宙化学における固体分析の重要性

- 流動性，原子拡散が遅い
- 過去の化学反応を保存
- 反応が界面で起こるため，反応の順番・履歴が残る
 - 例えば，結晶成長では新しいものほど外側に存在
- 反応の履歴から，それが接していた気体・液体の状態が分かる
- 気体・液体をトラップしている場合も

□ 組織学の重要性

- 従来の組織学の例
 - E コンドライトを融かしてエイコンドライトにしたとき，まず析出するのはかんらん石 (forsterite)
 - 平衡なら P 点で全ての forsterite が enstatite に変化
 - 反応が十分進まなければ中心が forsterite，外側が enstatite という結晶が出来る
- 従来の組織学と原子レベルの分析の結合が必要
 - 上の例で forsterite，enstatite それぞれの形成時の環境を知るためには元素・同位体の分配を調べる事が重要
 - 固体反応は開放系，時々刻々環境は変化
 - 元素・同位体の分配から分かること
 - 元素 : 分化の様子 (温度，用いるべき状態図)
 - 同位体 : 異なる同位体組成を持つ元素キャリアーの混合過程の有無 (元々その元素がどんな物質中に存在したか)
- 形成年代
 - 放射性元素を用いた年代測定
 - 微量元素の拡散 (上の手法で十分な精度の年代が得られないとき)
 - 拡散速度および拡散の進行度からタイムスケールが判明
 - 上の例では，enstatite が forsterite 表面に形成された直後は微量元素濃度が境界で階段関数状の変化を示すが，その後原子拡散により形状がなまされる
- 原子レベルの表面・局所分析が必要となる

? 1 つの結晶の年代を測定することは可能か

- 固溶体を取る系 (例えば Mg olivine と Fe olivine) では Mg olivine から Fe olivine へ変化するにつれ放射性元素の濃度が連続的に減少するため年代測定可能
- U-Pb の分析感度の向上で可能
 - 伊藤さんの分析 (後述 ?) など参照#

□ 表面・局所分析原理

- サンプルに "何か" を照射して，出てきたものを見る
 - 電子
 - イオン
 - 電磁波
- 形態，組成 (元素・同位体)，結晶構造，電子状態

- EPMA or SEM-EDS
 - 1 μm 程度に絞った電子線を照射，出てくる X 線で元素を同定
- EPMAによる鉱物組成マップ
 - 粗粒 CAI の構造
 - 鉱物（元素別）の色分け
 - 青 : 斜長石
 - 青白 : melilite
 - 黄緑 : 輝石
 - 赤 : spinel
 - 形成過程
 - 赤い結晶が最初に析出
 - 全ての結晶内に存在，自形を持つ
 - 粗粒 CAI は melt からの形成
 - 外縁の melilite
 - 外側ほど高温下で析出する組成を持つ
 - 外から内への結晶成長
 - CAI がだんだん大きく成長していったわけではなく，境界は始めから現在の位置にあったことを示唆
 - 斜長石，輝石は後から結晶化
 - リムの spinel，輝石は後から付着
 - + Work-Lovering rim#

? 最初に析出したにも関わらず spinel が大きくなるのは何故か

- CAI 中に元々 Mg が少ない
- 結晶が多数あるのは核生成率が高かったため，環境に依存

? spinel が他の結晶の核になったのでは

- そうかもしれない

? spinel の丸い構造は何か

- フランボイド（葡萄の房）構造と呼ばれる
- よく見つかり，実験的にも（偶然に）作られているが，なぜ出来るのかは不明

- 局所・表面分析法の比較
 - SIMS ... 微細構造・微量元素の分析に最適
 - 分解能 < 1 μm
 - 高感度 < 1 ppb

- Ims 1270
 - 塚本さんが使用している装置

■ 年代学

- 創世期年表（塚本 2000）
 - 天体の形成順序に関する 2000 年当時の理解
 - CAI，コンドリュール
 - 微惑星（コンドライト母天体）
 - 原始惑星（分化隕石母天体）
 - 惑星形成

- これが現在ではどのような描像に変わったか、という話
 - データが間違っていた訳ではないが、新たなデータが加わったことにより解釈を変えざるを得なくなった

□ 放射性同位元素

- 年表の改訂に利用出来る（十分な精度を出せる）核種
 - 長寿命核種（半減期）： ^{238}U - ^{206}Pb , ^{235}U - ^{207}Pb
 - 短寿命核種（半減期）： ^{26}Al - ^{26}Mg , ^{182}Hf - ^{182}W
- 年代測定の例として Rb-Sr 法が用いられるのは、説明がしやすいから

□ 放射壊変

+ 原理の要約

- + 壊変定数 λ は単位時間あたりに壊変が起こる確率
- + これを用いて時刻 t までに壊変により生成した娘核種の数を表す式にする
- + 年代測定にはこの式を逆に用いて、現在における娘核種の量を分析することで、形成時刻からの経過時間 t を求める
- + 娘核種に壊変由来でないもの（形成時に元々含まれていたもの）が含まれている場合、上の議論だけでは t を決定出来ない。その場合は同時に形成された元素組成の異なる鉱物（娘元素の初期同位体比および t が共通）について分析を行うことにより年代決定できる（アイソクロン法）。
- Rb-Sr 法
 - ^{87}Rb が ^{87}Sr に壊変（半減期： 5×10^{10} yr）
 - $t = 0$ では（同時に形成された）全ての鉱物は $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = \text{const}$
 - 時間が経過するにつれ、Rb に富む元素ほど $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が増加
 - 傾きから形成後の経過時刻 t が分かる
- 原理はこれだけだが、現実の系への適用が難しい
 - 以下具体例

□ Rb-Sr isochron of Juvinas eucrite (Allegre et al. 1997)

- エイコンドライトの形成年代
 - 鉱物アイソクロン
 - 各鉱物は単一のマグマから同時生成
 - 正しく火山岩の固化年代としての意味を持つ（cf. 全岩アイソクロン, 次項）
 - 逆に一直線上に乗るということは同時形成したことを示す（十分条件）
 - 形成年代： 4.60 ± 0.07 Gyr
 - 70 Myr も誤差あり
 - 年表の改訂には 1 Myr 程度の精度が必要
 - 原理的には当然だが、全岩組成も同一線上
 - 乗らないアイソクロンが後で登場
 - 本当に年代として使えるか？

? 縦のエラーが大きいのは何故か

- 分析精度は同程度だが、軸のスケールが異なるから

□ Rb-Sr for chondrules from Tieschiz H3 (Minster et al. 1979)

- 同一のマグマから形成されたものでないにも関わらず、異なるコンドリュールが同一直線上
- 全岩アイソクロン
 - アイソクロン法の本義においては、年代としての意味をなさない
 - それぞれのコンドリュールは異なるマグマから出来たものだから
 - にも関わらず一本のアイソクロン上に乗ることを説明する為には、"全てのコンドリュールは同時期に形成された" と考えると理解しやすい
 - 信じるかどうかは人次第
 - 前駆物質の形成年代や mixing の可能性もある
- 年代として解釈すれば、 4.53 ± 0.06 Gyr

□ Rb-Sr for chondrites (Minster et al. 1982)

- 0 コンドライトの全岩アイソクロン
 - 年代として解釈すると 4.490 ± 0.015 Gyr
 - 誤差は標準偏差、形成年代差ではなく平均からのばらつき
の大きさを意味する
 - 平均的なサンプル数が増えるほど標準偏差は小さくなる
 - + 最も新しいものと古いものの形成年代の差を意味しない
 - それでもまだ精度が足りない
- 年代として解釈すれば、この時に何かが起きたはず
 - コンドライトの形成年代 ?
 - 前駆物質の形成年代 ?

□ Pb-Pb isochron

- 利点
 - 精度が良い
 - 半減期が太陽系の年齢と同程度 (\sim Gyr) だから
 - + Rb の半減期は 48.8 Gyr
 - 横軸も同じ元素の同位体比 (cf. Rb-Sr 法)
 - 縦・横軸の元素が共通であるため、閉鎖系が破れてもそれが Pb の同位体比に影響を与えない限り年代にあまり影響を与えない
 - + Rb-Sr 法では、横軸は Rb/Sr 比で元素が異なるため、閉鎖系が破れた時の移動のしやすさが異なる。このため影響を受けやすい
 - ...と一般に言われるが、やはり動いたら信用出来ないと思うべき
 - U の同位体比は測る必要が無い
 - + 隕石の U は地球物質に対して測られた値 $1/137.88$ と等しい
 - 親核種が無い、揮発性が低く同位体分別が起こりづらい
- 初期鉛 (太陽系形成時の Pb 同位体比) を仮定すれば、1 点の分析でも年代測定が可能 (モデル年代)
 - 次項参照
 - ただし年代の信頼性は仮定の正しさに依存

? Pb-Pb 法でも傾きが年代を表すか

- そうだ

? ならばモデル年代でなくアイソクロンも求めることができるか

- 同一起源の 2 物質の測定が可能ならば, Rb-Sr 法同様初期鉛から進化したという仮定に依存しない年代が得られる

? なぜ初期鉛と名付けられたか

- コンドライトの全岩アイソクロンが初期鉛を通る
つまり, それ以前の鉛同位体比は一樣で, 太陽系の全物質における鉛同位体比の進化はそこからスタートした
(高温凝縮モデルと合致する考え方)

□ Pb-Pb isochron for chondrites & Pb-model age

- 全岩アイソクロン
 - 年代として解釈すれば 4.565 ± 0.004 Gyr
 - これも誤差は標準偏差
- 鉄隕石中の硫化鉄 (CDT, Canyon Diablo troilite) も乗る
 - "初期鉛" の同位体組成を保存
 - これより小さな $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ は太陽系内に無い
 - + FeS 中に Pb は濃集 (親銅元素) するが U はほとんど入らない (親石元素) するため, 初期の Pb 同位体比を保っている
 - 全てのコンドライト物質が初期鉛を通る線上に乗るのは, 太陽系全域で鉛同位体比が一樣だったと解釈

□ Pb-Pb isochron (Amelin et al. 2000)#

- Pb-Pb アイソクロンの式を, y 切片が年代を表す (壊変起源の Pb 同位体比) ような表式に変形
 - これにより初期鉛を仮定せずに年代測定 (cf. 下記補注)
- 測定方法
 - 酸で徐々に溶かす (leaching) することでマトリックスや地球の鉛からの汚染を除去
 - 処理が進むにつれて, 鉛同位体比が直線上を変動
鉱物毎に溶け方が異なることによるものと解釈すれば, 鉱物アイソクロンに類するものと見なせる
- + 初期鉛を仮定する必要が無くなったのは本当に変形のご利益 ?
 - + Pb-Pb 法でも 2 点以上測れば初期鉛を仮定する必要無し
 - + 変形のおかげではなく, 酸による leaching により 1 つの CAI に対し 2 点以上の分析を行えた (内的アイソクロンを決定できた) からでは ?

□ CAI の形成年代 (Allegre, 初期鉛を用いたモデル年代)

- 4566.0 ± 0.004 Gyr
- $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ の大きい側で一定の年代に収束, 小さい側は若い年代を示す
 - 大きい側が真の年代を示す, と主張
 - 汚染などの影響が相対的に小さくなるため

□ CAI, コンドリュールの形成年代 (Amelin)

- CAI
 - 加重平均をとって 4567.2 ± 0.6 Myr
 - 誤差の範囲で Allegre の結果と一致
 - 2 つの CAI は異なる直線上に乗る, どちらも初期鉛 (このプロットではずっと右側の 1 点) を通らない
 - 初期鉛からそのまま進化したものならば, 初期鉛を通る同一直線上
 - その後結晶分化した際の年代を記録

- コンドリュール : 4564.7 ± 0.6 Myr

□ CAI, コンドリュールの形成年代 (表)

- 4567.2 ± 0.6 Ma (Amelin et al. の CAIs) を太陽系の $t = 0$ と定義
 - このとき何が起きたか, 何の年代を示すかは不明
- 変成をあまり受けていないコンドリュールの形成年代差
 - $0.5 \sim 4.4$ Myr, タイプ毎にばらつく
 - 精度を上げるために複数のコンドリュールの分析値をフィットしたものであることに注意
 - 個々のコンドリュールはもっとばらついている可能性あり
- CAI について Pb-Pb 法で精度良く年代測定できる理由
 - Pb は揮発性成分であるため, 高温下で形成された CAI 中では壊変起源の Pb と元々含まれていた Pb の量比が非常に大きい
 - y 軸に近い位置まで測定値がある (壊変起源の Pb が多い) 場合と遠い位置にしかない場合とでは, 同じ精度の測定でも前者の方が y 切片の誤差が小さくなる
 - Amelin 式のプロットでは y 切片が年代を示すから

? 初期鉛を仮定した場合の方が精度が良いということか

- そうだ
- + 質問者は初期鉛が y 軸に最も近い点と誤解をしていると思われる
- + Amelin 式のプロットでは初期鉛は逆に y 軸から最も遠い点
- + なぜ精度が良くなる ?

? U は CAI 中でどこに含まれているか

- 4 価の U がペロブスカイト (CaTiO_3) の Ti サイトに入り濃集, それを測っているものと信じられている

? U の崩壊時に結晶は破壊されないか,

- それが Pb の移動を許して年代に影響を与えないか
 - α 崩壊なので, 付近 (~ 1 cm) の結晶は破壊される
 - それが年代に影響を与えるかどうかは不明

? 平均ではなく, 1 つのコンドリュールで年代を測れないか

- 可能だが, U/Pb 比が小さく精度が落ちるため, CAI と同列に扱った議論が出来なくなる

? Acfer 059 のコンドリュールは CAI よりも y 軸に近いが

- 不思議だが, 彼らの結果を信じるしかない

□ 地球の鉛モデル年代

- モデル年代が岩石の形成年代を示さない例
 - MORB (中央海嶺の玄武岩) の測定
 - "45 億年" を示す
 - 初期鉛との差として見た場合, 地球年齢程度の値
 - cf. 海洋底の玄武岩の寿命 : ~2 億年
 - 鋳物アイソクロンを引けば ~2 億年となるはず
 - 理論的根拠はないが, コア形成時の U と Pb の大規模分別が
今なお最も強い影響を残しているものと考えられる
 - コア形成時に元々存在した鉛はほぼ全てコアへ
 - 現存する鉛の大部分はウランの壊変起源
 - 数億年のばらつきはその後の結晶分化時の分別
or mixing 起源
- Achondrite (angrite) の鉛年代
 - 4566.18±0.14 Myr
 - 火山岩の分析であるため, モデル年代ではない
 - 融解の年代であるため, 原始惑星形成はこれ以前
 - 昔得られた値に比べずっと古い
 - コンドリュールより古くなった
- 微惑星の変成年代
 - アパタイトの形成年代として, 4562.7±0.6 Myr
 - コンコーディア上にプロット, 閉鎖系が保たれたことを示唆
 - 岩石学的 type の大きなものほど若い
 - 変成の年代であるため, 微惑星集積はこれ以前
 - 微惑星集積はコンドリュール形成の後
- Al-Mg 法
 - 短寿命 (消滅) 核種
 - 半減期 0.73 Myr
 - 現在では存在度が実質的に 0
 - 絶対年代ではなく相対年代
 - 初期値 (canonical 値) : $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \sim 5 \times 10^{-5}$ for CAI 結晶化時
- Al-Mg アイソクロン (同時刻に結晶化した 2 種の鋳物)
 - Al/Mg 比と $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ の基準値からのずれが比例
 - + これにより, 現存しない ^{26}Al が過去に存在したことが分かる
- Al-Mg アイソクロン (異なる時刻に結晶化した Al/Mg 比の共通な鋳物)
 - 早くに結晶化したものほど取り込まれる ^{26}Al が多いため,
 ^{26}Mg の増え幅大
 - グラフで上に行くほど古い
- 短寿命核種の年代学#
 - 長寿命核種の場合と横軸の取り方が異なることに注意
 - + x 軸に (Rb-Sr 法などと同じように) $^{26}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ を取ると,
全てのアイソクロンが y 軸に重なってしまう
 - 1 つの鋳物は y 軸と平行に上に進む

- 傾きが結晶化時の $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比に対応
 - ^{26}Al が太陽系内で一様に分布していたと仮定すれば, canonical 値の時点からの相対年代が求まる
- CAIs, chondrules, achondrites の Al-Mg 年代
 - 斜めの実線 : canonical 値の時に固化, 古い
 - CAI (逆に CAI の分布から canonical 値が決定)
 - x 軸に平行な線 : ^{26}Al が消滅してから固化, 若い
 - コンドリュール, エイコンドライト
- ^{26}Al in chondrules
 - 典型的には $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \sim 10^{-5}$ の時点で固化
 - ? 1 点の一つのコンドリュール (全岩アイソクロン) か
 - 鉱物アイソクロン, 個々のコンドリュールの固化年代を示す
- CAIs, chondrules, Al-rich chondrules の Al-Mg 年代
 - CAI : 5×10^{-5} にピーク, 3 Myr まで形成
 - コンドリュール : 1 ~ 3 Myr
 - ? 棒グラフの幅は何を意味するか
 - エラー, 若いものほど幅が広いのは壊変起源の ^{26}Mg が少なく誤差が大きくなるため
- CAI 前駆物質の ^{26}Al #
 - CAI の全岩組成
 - CAI の固化年代を意味しない, 前駆物質の形成年代を示唆 ?
 - 1 つの直線から外れる CAI は見つかっていない
 - 全ての CAI の前駆物質は同時形成
 - $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \sim 6 \times 10^{-5}$
 - 年代差に直すと ~ 0.1 Myr
 - y 切片が < 0
 - 現在の地球 (点線の交点) の Mg 同位体比を基準に取った図であることに注意
 - 地球が ^{26}Al を持っていた結果
 - この場合現在の地球の同位体比は $(^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_0 + (^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})^*$ となる. 一方, CAI の全岩アイソクロンの y 切片は $(^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_0$ となるから, 前者を基準にとると負となる
 - ? ここでの "前駆物質" とは何を意味するか
 - それが未解決な問題
 - ? なぜ地球とコンドライトが一致するか
 - + 形成時期が違うのだから一致しなくてもよいのではないか, という質問だと思われる
 - + 惑星集積時に Al, Mg の出入りはないと考えている ?
 - ? 地球やコンドライトがアイソクロン上に乗らないのはなぜか#
 - 太陽系の平均組成を表す点を中心に, CAI の

アイソクロンは回転するはず

- よって、地球やコンドライトが太陽系の平均組成を表すなら CAI のアイソクロン上に乗って然るべき
- + CAI 前駆物質形成時以降、後にコンドライトや地球になる物質では Al, Mg の出入りは無かったと考えている ?
- 解釈
 - CAI の前駆物質は Al を数倍濃集していた
 - + Al の濃集がなぜずれを起こす ?
 - コンドライト組成が太陽系元素存在度を表していない
 - 実は、真の太陽系元素存在度はアイソクロン上
- + 乗らなくてはいけない理由がよく分からない

□ ^{26}Al and ^{41}K in CAI

- CAI 中に ^{41}Ca が存在した痕跡 (娘核種 ^{41}K の量から)
- 鋳物アイソクロン, CAI の固化年代
- 半減期が 0.1 Myr と短い
 - 超新星などから ^{41}Ca が注入された後高々 < 1 Myr で CAI が形成されないと ^{41}Ca の痕跡は残らない

□ chondrule 前駆物質の ^{26}Al

- 全岩アイソクロン, 前駆物質の形成年代
- CAI 形成とほぼ同時に始まり, 1 Myr に渡り続く
- cf. 鋳物アイソクロン (1.0×10^{-6}) が示す固化年代は CAI 形成後 > 1 Myr

□ ^{26}Al in eucrite

- 鋳物アイソクロン, 固化年代
- 7×10^{-7} , コンドリュールよりも遅い
- 同じエイコンドライトでも, angrite について Pb-Pb 法で得られた年代 (~ 1 Myr after CAI) と大きくずれる
- 異なる現象に対応 ?
 - Pb-Pb はコア形成, Al-Mg は火成活動に対応, 火成活動はずっと後になってから起きた可能性

□ Achondrite の ^{26}Al

- 全岩アイソクロン
- 鋳物アイソクロンよりも古い値を示す
- 固化以前のなんらかの過程を保存
- 全岩と鋳物別分析の比較
- 全岩が鋳物アイソクロン上に乗らない
 - それぞれ異なるイベントを記録 ?

? ^{26}Al の太陽系内での不均質を反映しており, 年代を意味しないのではないか

- そういう議論もあるが, ここでは年代だと思って解釈するところなる, という話をしている

□ 惑星物質の ^{26}Al

- コンドライト, 火星の $\delta^{26}\text{Mg}^*$ のばらつきが $< 10^{-5}$
- ^{26}Al が内惑星領域全体で均質に分布したことを示唆

? 地球物質の $\delta^{26}\text{Mg}$ はどうやって測るか、それらは均質か#

- 様々な標準物質から
 - + basalt, mantle の olivine
- 壊変起源の ^{26}Mg は均質
 - 壊変起源でないものは変動 (分別?)
 - + なぜ? $\delta^{26}\text{Mg}^*$ の定義は?

□ Achondrite の $^{26}\text{Mg}^*$

- y 切片: 形成時の $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ 同位体比 (の地球からのずれ)
 - ^{26}Al の壊変により時間とともに増加するため、時計として用いることが可能
 - Ol in pallasite: -0.022
 - cf. CAI: -0.032
 - 年代に直すと ~ 0.8 Myr after CAI
 - aubrite
 - マグマオーシャンで形成された集積岩
 - ~ 1 Myr after CAI
 - ureirite
 - 未分化隕石が融解を始めたときに結晶化したもの
 - ~ 0.5 Myr after CAI
- angrite のコア形成に対応すると考えられる Pb-Pb 年代と一致

? ^{26}Al に注目する理由は何か

- 半減期が 0.7 Myr, 初期太陽系の年代学に適する
- 精度が良い

? ^{26}Mg を年代に直すには原点を決定する必要があるが, Al/Mg 比は天体によってばらつくのではないか?#

- 単純のためシングルステージモデルを考えるから OK
 - + 理解出来ない

□ ^{182}Hf - ^{182}W

- 半減期 ~ 10 Myr
- 金属を見ると, コア形成時点の $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ 比が保存
 - Hf ... 親石元素, W ... 親鉄元素
 - CAI 形成時の $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ との差から, コア形成年代を測定可能
- 地殻とマントル間で再度 Hf が分離すれば, マントル分化年代も求まる
 - e.g. 火星

? bulk はどうやって測るか

- 分化していない, コンドライトの値を用いる

□ ^{182}Hf - $^{182}\text{W}(1)$

- 各物質の $\epsilon^{182}\text{W}$ (δ 値の $1/10$)
 - CAI の形成時は最も小さい (initial 値)
 - コンドライトも < 0

- 地球の ϵ (マントル由来の火山岩) が基準
コア形成を経験しているため、コンドライトよりも高い
- 逆に言えば、地球のコア形成は ^{182}Hf が消滅する前に起きた
- エイコンドライトは大きく濃集
 - 早い段階で分化
 - 分化年代は鉄隕石の W 同位体比から
- 鉄隕石は initial 値と同程度
 - 親石元素の Hf を含まないため、分化時の W 同位体比を保存
 - よって、コア形成は CAI 後すぐに起きたことを示す
- 月も大きい
 - Hf が濃集
 - + なぜ？
- cf. コンドライトの値は地球と同じという分析結果 (10 年前)
- サンプルが W 炭化物の乳鉢ですりつぶされたものだったため、地球の W 同位体比を測っていた

? なぜ月が大きいか

- 太陽系 $\epsilon^{182}\text{W}$, $^{182}\text{Hf}/^{180}\text{Hf}$ 初期値
 - CAI 結晶化時の同位体比 (initial 値)
 - $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$
 - アイソクロンの y 切片から
 - $^{182}\text{Hf}/^{180}\text{Hf}$
 - アイソクロンの傾きから
- $^{182}\text{Hf}-^{182}\text{W}$
 - 形成年代のまとめ
 - chondrite : 太陽系の平均値
 - 鉄隕石 : CAI 形成後 1 Myr 程度で原始惑星形成
 - 火星・月・地球 : 30 Myr 以内にコア形成
- Vesta の核形成とマントル分化
 - eucrite の全岩アイソクロン上にコンドライトが乗らない
 - Vesta は最初一様にコンドライト組成だったと仮定
 - eucrite がそこから直接分化したのならば、アイソクロン上にコンドライトが乗るはず
 - まずマントルとコアが分離し、その後 1 Myr ほど後にマントル自身の分化 (部分融解に伴う火成活動) で eucrite が形成された可能性
- ? 火成活動だという証拠はあるか
 - ない、なんらかのイベントが 2 回あったということしか言えない
- ? 2 回融解させるのは大変なので、マグマオーシャンが固化するのに時間がかかったという解釈はどうか
 - シンプルで良いかもしれない
 - このように全岩アイソクロンからの年代は意味が不明瞭
- $^{129}\text{I}-^{129}\text{Xe}$
 - I は揮発性, Xe は希ガス
 - 開放系になりやすい

- 分かること
 - 低温な星間雲中や分子雲中の歴史を記録
 - 地球の大気形成年代
- I-Xe 年代
 - 変成の少ないコンドライト原始惑星形成より ~10 Myr 古い
 - 脱ガスは分化時（原始惑星，エイコンドライト形成時）に起こる
 - 解釈
 - 星間雲から原始惑星の分化までにかかる期間？
- $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ の初期値
 - $(^{129}\text{I}/^{127}\text{I})_0 \sim 10^{-4}$
 - cf. 生成時（超新星の r 過程）は $^{129}\text{I}/^{127}\text{I} \sim 1$
 - 10^{-4} まで減少するのに 0.1-0.2 Gyr 要する，これが太陽系物質の材料となった星間塵の形成期間に対応
 - 星間塵の平均寿命 5 億年と調和的
 - 星間雲同士の衝突頻度は 10 Myr に 1 回，0.1 Gyr の間に 10 回衝突
 - 太陽系の同位体組成均質化に寄与？
- 地球の Xe の過剰
 - ^{129}I が消滅するより前に地球大気形成
- 地球の Xe の過剰
 - ^{136}Xe の過剰
 - ^{244}Pu の壊変由来
 - Xe の同位体比を合わせて考えることにより，より詳しい大気形成過程が分かる
 - 原始惑星形成後 50~70 Myr に大気形成開始
 - その後 20 Myr で大気の 80 % が脱ガス
- 改訂された年表
 - 4570~4568 (Ma) : 分子雲から円盤形成の時代
 - 4567~4563 : CAI, コンドリュール形成
 - ~4540 : 原始惑星の分化（分化隕石形成）
 - 4563~4000 : コンドライト母天体の変成
 - 4560~ : 地球型惑星の分化
 - まとめ
 - 小さい天体から大きな天体へ，という単純なものではない
 - 微惑星・原始惑星とダストの共存期間が存在
 - CAI, コンドリュールとエイコンドライトの母天体はほぼ同時期
 - コンドライトはエイコンドライトより若い
- ? "大気形成" の大気とはどういう状態のものをさすか
 - Abe & Matsui モデルの大気
 - + 微惑星からの脱ガス大気

- ? だとするとなぜ地球形成後そんなに時間が空くか
 - そこが未解決問題
 - late veneer の年代 ?
 - + コア形成時に全てコア中に取り込まれるはずの親鉄元素がマントルや地殻に存在することから、コア形成後にもこれらの元素を供給する微惑星の小規模な付加があったと考えるモデル
 - + もともと大気組成を説明するために導入

- ? 短寿命核種の（超新星などからの）打込みの年代は分かるか
 - モデル（CAI が中心星形成後いつ形成されたか、など）を介さないと決まらない

- ? 本当に年代と見るべきなのか、他の解釈はないか
 - ダストを小天体が食べてしまうので、共存は理論的に難しいと思うが
 - + 難しくないという意見もあった
 - 小天体とダスト（CAI、コンドリュール）の共存期間があったことは間違いないと思う（cf. 伊藤さんの話）

- ? 相対年代は初期同位体比が不均質であれば年代にならない、絶対年代だけで議論するとどうなるか
 - angrite の Pb-Pb 法があるためあまり変わらない

- ? 26Al で融解させるには、原始惑星はいつまでに形成される必要があるか
 - CAI 形成後 2 Myr 以内
 - 2000 年時点ではこれよりあとの形成だと考えていたので、インパクトによる融解を仮定していた

- ? インパクトが始まった年代を分析から決定出来るか
 - K-Ar 法で決まるが、どこまで信頼出来るかは不明

- ? 小天体の破片からのコンドリュール形成を考えれば、ダストと小天体の共存という困難を解決出来るのではないか
 - 再集積時の問題が残されたまま
 - 分化隕石母天体はなぜコンドリュールや CAI を "食わず嫌い" したか ?
 - 逆に、コンドライト母天体はなぜコンドリュールや CAI だけを集めて形成されたか
 - 形成位置が多少違うくらいでは説明出来ない
 - + 理論的にはダストは円盤内で大きく動径移動する

■ 同位体顕微鏡

- 同位体顕微鏡開発年表
 - SIMS (Secondary Ion-microprobe Mass Spectrometer) の発展形
 - SIMS という最新機器のように感じられるが、1980 年以降基本的な部分での発展はない

- 1980 年 SIMS
 - 当時の値段 1 億円 !
 - 現在に比べかなり高い買い物だった

- 1980 年 SIMS & アラユルニウム

- アラユルニウム計画の手伝い
 - 全ての元素の、メルトと鉱物 (e.g., かんらん石) への分配係数を決定
 - 小沼ダイアグラム
 - イオン半径と分配係数の関係
- 分析の例
 - ボニナイト (右上写真)
 - 安山岩質の枕状溶岩, 島弧形成の初期段階に特徴的な岩石
 - 例えば, 化学平衡状態にある写真中の白丸の組を計測
- 1980 年 SIMS & アラユルニウム
 - 測定できる元素・できない元素
 - 陽イオン化し辛いものは測定不可
 - 陰イオン化するモードで測定可能な物もある
 - この辺の事情は 1980 年から変わっていない
 - 原理的進歩がないこと具体例
- 1985 年 隕石中の酸素同位体
 - コンドライト中の酸素同位体異常
 - 大きな非質量依存性の分別
- 1985 年 隕石中の酸素同位体
 - 組織学から, 共通のマグマから赤 → 青 → 緑の順に固化
 - 凝縮温度から予想される順と合致
 - 酸素同位体組成
 - 傾き 1 の直線上
 - 共通のマグマから形成されたとすると傾き 1/2 (質量依存分別) の直線上に乗るはず
 - 異なる酸素同位体組成 (160-rich, -poor) を持つ物質の mixing
- 1985 年 隕石中の酸素同位体
 - 当時考えたモデル : 2 段階起源
 - 形成時は全て 160-rich (赤)
 - その後, 環境の同位体組成が 160-poor に変化, それが固体内を拡散
 - 当時 melilite, anorthite の拡散係数は非常に大きいという分析があり, このため結晶全体が 160-poor になったというモデル
 - この大きな拡散係数は後に否定 (次項参照)
- 1986 年 酸素同位体の拡散
 - 固体拡散過程の重要性
 - 結晶中の周期的ポテンシャル場を実験的に見る手段
 - 拡散の速度から, ポテンシャル場が分かる
 - これを用いることにより, 分配係数の定式化が可能
 - SIMS を用いた測定から, melilite 中の酸素の拡散は遅いと判明
 - 前項の解釈が破綻
 - なぜ誤った拡散係数が得られたか

- 拡散の遅い結晶の分析
 - 短時間に、分析にかかる拡散を起こすために、
表面積を相対的に大きくして（粒子を小さくして）実験
 - 粗い表面では内部に比べ非常に拡散が速い
 - 表面の大きな拡散速度を固体全体の性質と見誤った結果
 - SIMS での測定のために開発したもの
 - 金のビーム源
 - 当時はビームに酸素を用いていたため、SIMS による
酸素同位体組成の分析は不可能
 - 2 次元的な撮像装置
 - 拡散のパターンを見るため
 - 酸素は結晶の境界から拡散
- 1988 年 2 次元粒子撮像素子
- 同位体顕微鏡の構成
 - 光源 : イオン源
 - レンズ : 質量分析計
 - ディテクター : 検出器
 - この検出器の開発を現在まで続けている
- 荷電粒子撮像素子 SCAPS
- 光用の CCD は使いものにならない
 - CCD 上に電極を固定するための絶縁膜はイオンを通さないため
- ディテクター部のチャンバーの写真
- 自分で設計図作成
 - 真ん中が SCAPS
- SCAPS の特徴
- 荷電粒子の直接検出が可能, etc.
 - SCAPS の原理
 - イオンの衝突により 2 次電子が放出, それにより起こる
電極の電位の変化を検出
 - ? イオンが打ち込まれ続けたら電極が摩耗しないか
 - 確かに摩耗するが, 計算上数十億年は持つ
 - 電子と同時に 2 次イオンも放出される (SIMS と同じ)
ため, 確かに電極は削られていくがごく微量
- 2001 年 Isotope Microscope system
- 分析装置とポーズを決める若き日の国広さん, 永島さん, 伊藤さん
- Isotopic Microscopy using SIMS
- cf. EPMA (Electron Probe Micro-Analysis)
 - イオンではなく電子を当てる
 - ターゲットの何処に作用するかが異なる
 - 電子 : 電子雲に作用

- イオン：原子核に作用
- ターゲット物質の電子が励起，それが基底状態に戻るときに光を放出するのでそれを測定
- Imaging の方法
 - Scan Imaging
 - 絞ったビームを当てる場所を移動させながら測定
 - detector は 0 次元でよい
 - 収差を気にする必要がなく，感度が良い
 - 広い領域を分析するには効率が悪い
 - 分解能を上げるにはビームを絞る
 - Direct Imaging
 - ビームを広く当て全体を測定，目と同じ
 - detector は 2 次元が必要
 - 収差のためしぼりを入れる必要があり，感度が悪い
 - 広い領域を分析するのに効率が良い
 - 光源の強度を大きくすることにより高い精度を得られる
 - イオンの数が増すことで統計誤差が小さくなるため
- Ion Optics of Direct-Imaging (Stigmatic) SIMS
 - 光源部 (entrance slit まで)
 - イオン源から照射されたイオンがサンプルを掘削
 - 検出される原子の数はイオン化効率 (掘削された原子のうち，イオン化するものの割合) に依存
 - SIMS では 0.1 % 程度
 - 両矢印は "凸レンズ"
 - 実際には電極のリング
 - レンズ部
 - 電場と磁場で 2 回曲げることにより，同じ m/Z のイオンを 1 点に集めることが可能 (二重収束型)
 - スパッタリング時に同じ m/Z のイオンでも様々なエネルギーを持つため，磁場だけでは 1 点に集まらず質量分解能が下がる
 - 結局出口で m/Z について単色化，特定の質量のイオンだけがディテクター部へ
 - ディテクター部
 - 2 次元検出器に投影 or イオンを 1 つずつカウント
 - 得られた像 (右下)
 - BSE (左下) に比べると分解能は劣る
- Spatial Resolution of Stigmatic Optics
 - 空間分解能
 - 絞りをを用いることで $\sim 0.3 \mu\text{m}$
 - 但し，感度が 1 桁下がる
- Performance of Secondary Ion Optics for Cameca ims 1270
 - 酸素のような主成分元素の場合，1 % の統計精度を得るのにサンプルは 10 nm 程度掘削

- ? 同位体比はどのように測定するか
 - 一度に測れるのは 1 つの同位体のみ, よって酸素なら 3 回測定を行う
- ? その際, 掘削の影響はないか
 - 厳密にはあるが, 分解能よりも掘削される深さは小さいため同じ部分を測っていると見なせる
- Conventional 2D-Detectors for Stigmatic SIMS
 - デテクター部
 - 従来の方式では様々な問題点がある
- SCAPS (Stacked CMOS Active Pixel Sensor)
 - CMOS デテクター
 - CCD (光子) の原理をイオンに応用
- Non-destructive Readout (NDRO)
 - 生データにはホワイトノイズが入る
 - 個々の SCAPS の感度差から
- Reset frame correction
 - フレーム間の差分を取ることでノイズを除去
- Non-destructive Readout (NDRO)
 - 酸素を同位体毎に計測
- Linearity and Dynamic range
 - 検出限界 : イオン 3 個
- Example of isotope image
 - Si 基盤上に Al の文字があることが分かる
 - 基盤の明るさのムラ
 - 照明の不均質を反映
 - 均質に当てるのは大変
 - 補正を行い, 均質な照明下での像を得る
- BSE vs secondary ion image
 - Si (160 で規格化) で色づけ
 - spinel 中の Si の点
 - 輝石の包有物
 - ? 結晶の右側の縁がぼやけているのは何故か
 - レンズのぼけ
- Spatial resolution
 - 1 μm
 - + BSE イメージの粒界との比較 ?
- O isotope image
 - 180/160 の生イメージ
 - 180 は存在度が小さいため, 統計誤差によりざらつく

- 分かり辛い
- Effect of image processing
 - 画像処理の方法
 - binning (幾つかのピクセルをひとまとめに扱う)
 - 1 ピクセル $0.6 \mu\text{m}$, 分解能 $\sim 6 \mu\text{m}$
 - smoothing (滑らかなグラデーションにする)
 - 酸素同位体組成差 40 %, 拡散パターン無, などが分かる
- ? ぼけと拡散をどうやって区別するか
 - 拡散の議論をする場合にはぼけのない画像を撮る
- For 170 imaging
 - 160H を分離する必要あり
 - スリットを入れて除去
- 170/160 vs 180/160
 - 180 に比べ 170 は存在度が小さいため, 精度小
- Evaluation by conventional results
 - $\sim 2\%$ の違いでかなりイメージが劣化
- Application I : Survey of presolar grains
 - マトリックスを酸素同位体で分析
 - 170 のイメージにのみ存在する白い点がプレソーラー粒子
 - $\sim 1.5 \mu\text{m}$ の輝石
 - ? 酸素同位体の画像だと $1 \mu\text{m}$ よりずっと大きく見えるが
 - 非常に強度が強いため像がにじんだ結果
 - ? 170 や 180 に乏しい異常を持つものは発見しづらいということか
 - そうだ, よってバイアスがかかることになる
 - ? にじんでいるにも関わらずプレソーラー粒子を輝石の結晶だと同定できるのは何故か
 - 同位体異常の中心に存在するため
- Application II : Oxygen isotopic variation in the early solar system
 - 鉱物の形状と酸素同位体比の分布が一致しない
 - 1 つの結晶の内部にも酸素同位体比不均質が存在
 - これまでは鉱物毎の議論だった
- Application III : Hydrogen distribution and the isotopic variation of a Martian meteorite
 - 火星の水素 (アパタイト中) の同位体組成
 - + 大気散逸過程の手がかり
 - 割れ目 (火星でのインパクト時に形成) に H_2O が吸着
 - この H_2O が火星のものだとすると, 大気中のほうがマントルに比べ D/H が低いことになる
 - 理論的には, 大気中のほうが D/H が高いはず
 - + H の方が軽く散逸しやすいため

- 実は地球大気の汚染 (fall にも関わらず)
 - これまでの分析は地球の組成に引きずられて、火星の D/H を低く見積もっていた
- 地球に比べ、4.5 Ga は 4 倍、1.0 Ga は 5 倍 D が濃集
- 同位体顕微鏡を用いることにより、何を (どの部分を) 測るべきかが一目瞭然になった

■ 酸素同位体組成

□ Oxygen

- 3 番目に多い元素
 - トレーサーになりやすい
- 固体中で最多の元素
 - 地球の 50 % (元素数で) が酸素
 - 古いものは固体中に残る
- 結合する相手により、揮発性元素でも難揮発性元素でもある
 - 固気両相を行き来することから、円盤の様々な過程を記憶
- cf., S
 - 鉄のトレーサとしては優秀だが、酸素の方が応用範囲が広い

□ Oxygen isotopes

- 3 つの同位体が存在
 - 16O ... 99.7, 17O ... 0.04, 18O ... 0.20 %
 - 通常の分別過程 (δ の図で傾き 1/2 の直線上) と混合過程 (その他) を区別可能

□ O isotopic heterogeneity in the solar system

- コンドライトは様々な起源を持つ物質の集合体だから、酸素同位体組成が多様でも不思議ではない
 - 確かに異常は発見されたが、何故か規則正しい変化
 - 40 % の変動幅
 - 通常の分別過程では数 %
 - 傾き 1
 - 酸素の源は 16O-rich, -poor な 2 種の物質

□ O isotopic heterogeneity in the solar system

- 惑星・小天体の酸素同位体組成
 - 各天体は傾き 1/2 の直線上に乗るものが多い
 - 形成後の分別
 - 天体間ではばらつく (ただし数 % 程度)
 - 分別過程以前, 集積時の混合過程によるずれ
 - CI のみ大きく外れる
 - 強度の水質変成を経験しているため
 - 鉱物は H₂O との同位体交換により質量依存的に 17, 18O に富む
 - その後水は宇宙空間へ散逸
- サイズが小さいものほど同位体組成のばらつきが大きい

- 多くの物質を集めることによる平均化の結果
- 0 isotopic heterogeneity in the solar system
 - まとめ
 - 160-rich な AOA, -poor なコンドリュール, 両方にまたがる CAI
 - ? 160-rich なコンドリュールが存在するが
 - 非常に珍しい例, 後述
 - ? 傾き 1 の直線から外れるものはないか
 - 数 % の範囲で一致
- Refractory inclusions
 - 細分類
 - fine-grained CAIs, AOA
 - 気相から凝縮
 - coarse-grained CAIs
 - 液滴から結晶化
- Fine-grained CAIs
 - 右で組織がぐちゃぐちゃしているのは水との反応により
 - 2 次鉱物が生成したため
 - 水質変成が進むにつれ 160-poor
 - 全ての type のコンドライト中に存在
 - 変成を受けていないものは基本的に 160-rich, 例外も存在
 - 直線的な境界からよく見つかる
 - 部分融解後, 最後まで残ったメルトポケット
 - 部分融解時の環境が形成時の環境と変化し, 酸素同位体組成が 160-poor になった?
 - 形成期間
 - < 2 Myr
 - 円盤 (環境) の酸素同位体組成の進化を示唆
 - 160-rich から -poor
 - ? 部分融解時に環境と同位体交換した部分の組成と, 表面からの距離に相関はあるか
 - 解析が難しく, 調べていない
- Amoeboid olivine aggregates (AOAs)
 - 間の白っぽい部分は変成によるもの
 - 変成を受けていないものはほぼ 160-rich
 - 表面に 160-poor な pyroxene が存在する AOA (Murchison)
 - pyroxene は olivine 形成後の比較的穏やかな加熱時に形成
 - 表面の olivine が周囲の SiO₂ と反応
 - 周囲の環境が 160-poor に進化していたことを示唆
 - やはり円盤環境が 160-rich から -poor に進化したことを示唆

- 形成期間
 - ~2 Myr
- Coarse grained CAIs
 - 160-rich, -poor な鉱物
 - 凝縮温度（凝縮順）と同位体組成の相関無し
 - 形成環境の酸素同位体組成は一方向的でない変化
- Evidence 1: Overgrowth of 160-poor melilite
 - 2 つの melilite 結晶
 - 劈開面の向きの違いから判別
 - melilite は固溶体を形成するため化学組成が連続的に変化, これを同位体顕微鏡でマッピング
 - Akermanite 量が少ないほど高温で凝縮, よって古い
 - 結晶は矢印の向きに成長
 - Akermanite 量のピークが粒界
 - 一つの結晶内で酸素同位体組成が急に変化
 - 結晶成長の方向から, 160-rich から 160-poor
 - step function 的なパターンから, 拡散によるものではない
 - 元々あった結晶が部分融解し再度成長を開始した時に, 周囲の酸素同位体組成が 160-poor に変化していた
 - 一つのアイスクロン上 (Al-Mg) に乗る
- Evidence 2: Work-Lovering rim
 - CAI の表面に存在
 - 160-rich
 - 円盤環境は 160-rich → -poor → -rich と変化 ?
 - 時間間隔 ~1 Myr
- Evidence 3: A chondrule-bearing CAI, A5
 - chondrule-bearing CAI
 - melilite, chondrule をガラスが取り囲む
 - 環境が 160-poor → -rich と変化したことを示す
 - ガラス部分の組織からも, こちらが後になって溶けたことを示す
- Evidence 4: $\delta^{16}O$ isotope vs $(^{26}Al/^{27}Al)_0$
 - Coarse grained CAIs
 - 凝縮順

- spinel	rich	5.1×10^{-5}
- melilite	poor	5.2×10^{-5}
- fassaite	poor	4.2×10^{-5}
- anorthite	rich	< 0.3
	poor	< 0.3
 - fassaite までは数十万年, その後 2 Myr 経っても 160-rich な環境があったことを示唆

- ? fine grained CAIs, AOAs ではシンプルな解釈が成り立つことに鑑みて, coarse grained CAIs の複雑さは前駆物質に由来すると考えたほうがよいのではないか
- fine grained CAIs や AOAs は小さく, そうした履歴が発見し辛い or 残り辛いからシンプルに説明できるのではないかと考える
- Y20a: The fragment of Coarse-grained CAI from Yamato-81020 (C03.0) chondrite
- 鉱物毎の Al-Mg アイソクロンと酸素同位体組成
 - ~0.7 Myr で 160-rich と -poor を行き来
- ? 0 は周囲と同位体交換しているのに, Al, Mg の閉鎖は保たれるのか
- 鉱物表面をたたくガス中の Al, Mg は 0 に比べずっと少ない
 - 太陽組成でも $0 \gg \text{Al, Mg}$
 - さらに Al, Mg は難揮発性
- ? 理論的には coarse grained CAIs を 0.7 Myr も太陽近傍で保持するのはほぼ不可能だと思うが
- 未解決の重大な問題
- 7R-19-1
- 160-rich (古), -poor (新) でそれぞれ 1 つのアイソクロン
 - 間隔 0.4 Myr
- HN3
- 160-rich (古), -poor (新) でそれぞれ 1 つのアイソクロン
 - 間隔はほとんどない
- 年代 vs 酸素同位体組成 (粗粒 CAI)
- 160-rich, -poor を行き来
 - 各 CAI が経験した環境の組成は同期していない
 - 160-rich, -poor な環境を併せ持つ円盤内を CAI がランダムに移動した結果?
 - astrophysical なセッティングは不明
- ? 0 の同位体交換はどれくらい効率的か
- よく分かっていないが, CAI の同位体組成を説明する
- Acfer 214 CH chondrite
- 典型的には -20% (少数) から 0% 付近
 - 特異な例外: a006
 - 現時点で 1000 個に 1 個
 - -80%
 - 組成 (olivine) ・組織 (球, ガラス) 的にコンドリュール
 - Mg, Si の同位体組成も地球とほぼ重なる
- ? 一般的なコンドリュールと組織が違うように見えるが, 同様の組織を持ったものは他にもあるか

- 同様の組織のものはたくさんあるが、酸素同位体組成は 0 %
- 複数点で測定しているため、局所的な異常を見ているわけではない

? CH はインパクト起源と言われる CB と近縁といていたが、一般的なコンドリュールと成因は同じと考えてよいのか

- 違うかもしれない
- 少なくとも CH と CB は成因的には全く無関係

? コンドリュールは CAI と同時期に形成されていたにも関わらず、円盤の酸素同位体組成の行き来を記録していないということか

- そうだ

□ コンドリュールの形成条件

- chondrule precursor 中に AOA が存在したため、中心が 160-rich なものもある

□ Sp bearing chondrules

- コンドリュールの結晶化年代
 - 酸素同位体異常の小さな (CAI 起源でない) spinel (Al を多く含む) を選んで測定
 - コンドリュール中で最も高温で形成されるため、形成後の加熱イベントを生き延びた可能性が最も高い
 - $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 \sim 1.0 \times 10^{-5}$, 1~2 Myr after CAIs
- 実際に年代が測られたコンドリュールで CAI と同程度の年代を示すものは見つかっていない
 - chondrule bearing CAI との整合性は ?

□ C1m (chondrule)

- 複数回の融解を示す組織
 - rim がコアに比べ 160-rich (-20 %)
 - この時代にも環境の酸素同位体組成変動があったらしい
 - spinel と diopside で Al-Mg 年代が異なる
 - コンドリュール形成時 spinel が析出
 - その後、融点の高い spinel 以外は再融解

? 外側の層構造が雹に似ている

- 雹の場合、対流セル中を上下するうちに付着・融解を繰り返すことにより形成される
- やはり円盤中に 0.1 Myr 以上保持しなければならない、という問題がある

□ Mineralogy of matrix

- 結晶が小さいためこれまで解析出来なかった
 - 典型的には 100 nm, 10 nm ~ 10 μm の広がり
 - 酸素同位体組成などは全く不明
- ごく少数存在する変成を受けていないものに注目
 - etc., Acfer 094

- ほとんどは母天体上における水質変成を受ける
- Matrix of primitive meteorites
 - Acfer 094
 - 構成物と存在度
 - アモルファスシリケート : 40 %
 - 非晶質, 元素組成が不定比
 - 結晶質シリケート : 50 %
 - 硫化物 : 5 %
- Presolar silicates in matrix
 - プレソーラー粒子
 - 酸素同位体組成が周りと全く異なるため, はっきり見える
 - ~100 % の差
 - 存在度 < 100 ppm
- Homogeneity in matrix
 - マトリックスの大部分は酸素同位体的に均質 (± 5 %) に 160-poor
 - マトリックスの大部分はプレソーラー起源でない
 - 所々に < 60 % 程度の濃淡
 - CAI や AOA と酸素同位体的に関連する sub-micron サイズの物質が含まれる
 - 大きな粒はコンドリュールの破片
 - 各成分の混合比はコンドライト全体のそれとほぼ一致
- Quantification of matrix components
 - ほとんど 160-poor
 - 160-rich な物質 : 1~5 %
 - コンドリュールに対する CAI の存在度と合致
 - 形成機構
 - 気相からの凝縮
 - コンドリュールや CAI が碎けて混じった訳ではない
- Origin of 160-poor dust
 - 初めは全てプレソーラー粒子だったはずなのに, どうやってダストの大部分を reprocess するか?
 - 高温凝縮モデルの復権?
 - cf. CAI の前駆物質形成年代が共通, 酸素以外に同位体の異常がない
 - + ただし, 理論はこのような過程を現時点で説明できていない
 - 太陽系の "均質性" を如何に説明するかが残された最大の課題
- 太陽系の宇宙化学的特徴
 - 酸素同位体異常の歴史的解釈
 - 超新星により純粋な 160 を含む物質が注入された結果
 - この爆発が同時に分子雲収縮・太陽系形成のトリガーとなった
 - 他の元素の同位体組成に異常がないことが大きな問題点

- CO 分子の光解離現象 (分子雲で起こる普通の現象)
 - Clayton, 2002
 - 日本では 2000 年に地球化学会で発表 (世界初)
 - CO self-shielding
 - CO は UV を吸収し前期解離するが, 同位体の質量差により解離エネルギー, すなわち解離が起こる UV の波長が異なる
 - それまでは CO₂, H₂O の self-shielding
 - 清水さん, 北村さん
 - 低温の nebula では主要な酸素キャリアーと考えられていた
 - しかし, 同位体差による解離波長があまり分離しない

- CO 分子光解離における自己遮蔽効果
 - C16O, C17O, C18O の存在度の違いが鍵
 - 存在度の大きい C16O の解離波長の UV は星雲表面で吸収され尽くす
 - 存在度の小さな C17O, C18O は星雲内部でも解離

- 分子雲における CO 自己遮蔽効果
 - なぜ分子雲での反応を採用したか ?
 - 分子雲での CO self-shielding は天文の分野で以前から議論されていたため
 - 星雲内部で CO は 16O-rich, 逆に, O は 16O-poor に
 - 反応性に富む O はダスト上で氷層形成
 - ? なぜダスト表面反応を考える必要があるか
 - 発熱反応であるため, 熱を逃がしてやる必要がある

- 分子雲における酸素同位体分別とその保存
 - 自己遮蔽により 2 つのリザーバ形成
 - CO : 16O-rich
 - H₂O 氷 : 16O-poor

- Evolution of O isotope distribution
 - 初期状態
 - CO : super 16O-rich
 - H₂O : super 16O-poor
 - dust (silicate) : solar composition (地球から見ると 16O-rich)
 - 原始星段階
 - snow line の外側は初期状態のまま保存
 - snow line の内側では H₂O が太陽組成の混合比を保ったままガス化, 酸素同位体組成も太陽組成 (分子雲の平均組成)
 - T-Tauri 星段階
 - ガス抵抗を受けることにより氷ダストは相対的に太陽方向へ落下
 - snow line を通過し H₂O 氷が蒸発すると, 落下が止まるため H₂O 蒸気が溜まり, 内惑星領域で濃集
 - 内惑星領域の気相の酸素同位体組成が H₂O に引きずられて 16O-poor になる
 - この段階でコンドリュール形成などによりダストがガスと

同位体交換すると、太陽系の平均に比べ 160-poor な組成を得る

- このモデルにおける CAI の酸素同位体異常の解釈
 - CAI は太陽系の平均組成を保存
 - むしろ、地球やコンドリュールの方が太陽組成から見て "異常"
 - 内惑星領域で H₂O が濃集した後に形成されたため
 - 地球の組成を基準とした結果、CAI が異常に見える

? 太陽風の分析はないか

- Genesis からはデータが出ていない
- lunar soil に打ち込まれた太陽風の分析からは正反対の結果
 - このモデルを支持する結果、支持しない結果の両方が出ている

□ For Gas planets

- 太陽組成に比べ重元素に濃集
 - 巨大な氷天体のコアがガス降着を引き起こしたため
- 重元素濃集度と氷惑星の酸素同位体組成の推定値から、各惑星の値を予測可能
 - 外側の惑星ほど重い
 - 観測により検証可能

? 彗星や木星では D/H 比が観測されているが、同様の方法で酸素同位体組成を観測できないか

- 彗星については、精度は悪いが 160-poor らしいという結果がある

□ ダストの濃集は円盤ガスの酸素同位体比を効果的に変えうるか ?

- H₂O が太陽組成の数倍程度濃集すれば OK

□ 酸素同位体分布

- 典型的な CAI, コンドリュールは 0~40 %, モデルはもっと大きな同位体異常を持つ物質の存在を示唆
- 小林さんの -80 % コンドリュール
 - 太陽系の平均酸素同位体組成を保存したもの
- new-PCPs
 - 160-poor な H₂O の同位体組成に対応

□ Discovery of O isotope hot region (new-PCP)

- PCP ... poorly characterized phase
- サイズ : ~10 μm

□ O isotopic composition of new-PCP

- +150~200 %

□ Chemical composition of new-PCP

- Fe, S, O

□ X-ray diffraction by synchrotron radiation

- FeS + Fe₃O₄
- 回折のリングパターン
 - 極微粒子, 方向がランダム
- TEM study
 - X 線回折パターン
 - Fe₃O₄ のラウエ斑の間に 2 つの小さな斑点
 - Fe₃O₄ の結晶 3 つ毎に変調
 - このような結晶構造は地球上で見つからない
- Phase diagram of Fe-S-O-H system
 - 形成環境
 - 相図から, 370 K 以下
 - FeS と Fe₃O₄ が共存することから
 - H₂O 分圧を 5×10^{-4} と仮定
 - Fe が星雲の主要酸化剤である H₂O により酸化されて形成されたと考えるのが自然
 - よって, new-PCP の酸素同位体組成は H₂O の値を反映
 - どこで形成された ?
 - 星雲 ... snow line の内側
 - 温度条件は OK
 - 反応に長い時間を要する点が問題
 - 母天体 ... 氷天体の表面
 - まだ周りの珪酸塩と同位体交換していない H₂O と交換
 - 水質変成を受けないうちに乾燥する必要あり
 - 天体内部ではなく表面なら OK ?
 - この場合, Acfer 094 は彗星の化石の可能性
- ? 普通に水質変成したものは酸素同位体異常を示すのか
 - 水質変成の進んだ隕石中の Fe₃O₄ で, 5 % の異常が見つまっている
 - 大きな異常を示さないのは, 周囲の 160-rich な珪酸塩との交換で平均化された結果
- Fossil of the Solar System primordial water
 - 個々の粒子サイズ ~10 nm
- ? 彗星起源だとすると, 熱源としては何を考えるか
 - 26Al などの内部熱源
- ? プレソーラー粒子でないとする根拠は
 - 確証はないが, 以下のような根拠がある
 - 従来見つまっているプレソーラー粒子に比べ異常が小さい
 - 従来のプレソーラー粒子に比べ非常に大きい
 - CAI-コンドリュールを結ぶ傾き 1 の直線上に乗る
 - Fe, Si の同位体組成はまだ計っていない
- 原始惑星系円盤ガスの酸素同位体変動
 - 複雑な酸素同位体組成変動を説明するモデル
 - CAI, コンドリュール共に円盤内縁で形成

- 原始太陽のコロナは 160-rich, 円盤ガスは 160-poor
 - コロナは低圧だが高温なため同位体交換は高圧な円盤内部と大きくは変わらないと考えられる
- 円盤内縁の動径位置が変動することにより, ダスト周囲の同位体組成が変動する
- ダストはそのままでは太陽に落ち込んでしまうので, X-wind で円盤に戻す

? 他の元素で self-shielding は起きないか

- N, C で起こる可能性あり
- N の同位体異常について観測やモデル化を進める予定

? CO の self-shielding を考えている以上, C で同じことが起きたことを示せないか

- C が適当な phase を作ってくれないので難しい

? C, N では 3 つの同位体を持たないため, 分別と混合を区別できないため難しいのではないか

- その通りだが, 有機物の主要元素なので調べる予定

? S の同位体異常について調べるとよいのではないか, H₂S で同様のことを考えられないか

- H₂S の場合, 原子の質量が大きく異なるため self-shielding が効きづらい

■ プレソラー粒子

□ 惑星状星雲 NGC6302のスターダスト

- 観測スペクトルより
 - crystalline olivine, pyroxene
 - amorphous silicate
- 隕石中に存在してほしいが, 実際はどうか?

□ スターダストの種類 (Mlster & Waters, 2003)

- O-rich dust (Amorphous silicates, cristalline silicates, Al₂O₃ etc.)
- C-rich dust (Carbonaceous dust, SiC, TiC, diamond)
- Other dust species (MgS, FeS, Metallic Fe)

□ スターダストの生産

- AGB (M), AGB (C)がメイン
- SNでの生産量は不明

□ 太陽系 (宇宙) の化学組成

- 太陽系の化学組成から星間塵スターダストとしてシリケートが一番多く存在することが予測される

- CはCOガスとして存在: $C+O \rightarrow CO$
- MgはMgOとして存在: $Mg+O \rightarrow MgO(g)$
- SiはSiOとして存在: $Si+O \rightarrow SiO(g)$
- MgO(g)とSiO(g)が反応して, olivineやpyroxeneができる
- $2MgO(g)+SiO(g) \rightarrow Mg_2SiO_4(s)$
- $Mg_2SiO_4(s)+SiO(g) \rightarrow 2MgSiO_3(s)$

- 星の指紋—同位体—
 - 星の質量、進化により核合成プロセスが異なる
 - スターダストの同位体比は太陽系の物質とは全く異なる
- プレソーラー粒子研究の歴史
 - SiC など、太陽系で形成されない物質しか見つからなかった
 - 豊富なはずの silicate が見つかっていなかった
 - 隕石の主成分であるsilicateを全て溶かしてその残渣からしか発見する方法がなかったのが原因
- 同位体顕微鏡による広域その場分析
 - 隕石を溶かさず、そのままの状態と同位体分析をすることができる
 - silicate 50 ppm
 - oxides 1 ppm
 - carbonaceous 10 ppm?
 - 13種類の炭素質コンドライト、5種類の普通コンドライト、3種類のエンスタタイトコンドライトを分析
 - pyroxene, olivine, SiC, Graphiteが見つけれられている
- presolar silicateの存在度
 - 始原始的な炭素質コンドライトに多く残っている
- ほとんど AGB, RG 星起源
 - SN 起源のものが少ない
 - これらからは太陽系が作れない
 - サイズ分布
 - 300 nm にピーク
 - 分析限界の下限
 - もっと細かいものはもっとある ?
 - SN 由来のダストの理論値 7 nm
 - 冷却速度が速いため
 - または、そもそも星間空間の固体量は少ない
 - 分子雲で初めて形成、同位体的に均質化される
- 彗星のスターダスト
 - 酸素同位体はコンドライトと変わらない

？ どのくらいの温度でプレソーラー粒子は破壊されるか

 - 100 °C で ~100 nm のプレソーラー粒子は破壊される
- 起源の AGB 星の数 20~70
- olivine と pyroxene の割合は ?
 - E コンドライトでは pyroxene
 - 他では同程度
- まとめ
 - スターダストは消えた ?
 - 元々少ない ?
 - 星間ダストの間に良く混合 ?

? 何個のAGB starがあればいいのか

- 起源の AGB 星の数 20~70

□ 同位体ナノスコープ

- ナノメートルの分解能を持つ同位体顕微鏡
- 以下のような特徴的な部位によって成り立っている
 - 20nmのGaプローブ
 - フェムト秒レーザーの照射により、100%イオン化を実現
 - 多重周回飛行時間型質量分析計MULTUMによって質量分解能を向上
 - 不感時間ゼロの計測法：能動型2次元イオン撮像素子SCAPS