

## 地球惑星物質科学の現状と展望

平成9年7月15日

日本学術会議

鉱物学研究連絡委員会

この報告は、第16期日本学術会議鉱物学研究連絡委員会の審議結果をとりまとめて発表するものである。

委員長 末野重穂 (筑波大学地球科学系教授)

委 員 青木謙一郎 (日本学術会議第4部会員、東北大学名誉教授)

秋月瑞彦 (東北大学大学院理学研究科教授)

大谷栄治 (東北大学大学院理学研究科教授)

大本 洋 (東北大学大学院理学研究科教授)

加藤祐三 (琉球大学理学部長)

北村雅夫 (京都大学大学院理学研究科教授)

小籐吉郎 (徳島大学総合科学部教授)

小松正幸 (愛媛大学理学部長)

藤野清志 (北海道大学大学院理学研究科教授)

豊 遥秋 (工業技術院地質調査所地質標本館館長)

渡辺 隆 (上越教育大学学校教育学部教授)

# 地球惑星物質科学の現状と展望 鉱物研連報告

## 目次

### I はじめに

#### I I 地球惑星物質科学の現状

##### I I - 1 地球惑星物質のキャラクタリゼーション

- (a) 鉱物物性の研究
- (b) 鉱物、岩石の組織の研究
- (c) キャラクタリゼーション技術の開発

##### I I - 2 シミュレーションとしての地球惑星物質科学

- (a) 地球惑星物質の挙動や相変態についての実験によるシミュレーション
- (b) 超高圧下での実験によるシミュレーションと地球惑星の内部
- (c) 地球惑星物質の計算機科学

##### I I - 3 地球惑星物質科学の成果（パラダイムの構築に関連したもの）

###### I I - 3 - 1 地球惑星物質の挙動

- (a) 結晶化学および結晶物理
- (b) 格子欠陥
- (c) 相変態論
- (d) 組織形成論

###### I I - 3 - 2 地球の形成進化とダイナミックス

- (a) 地球史初期物質の探索と初期地球の解明
- (b) 超深部物質の発見と地殻マントル深部過程
- (c) マグマ学、火山内部構造、火山プロセス、島弧の三次元モデル
- (d) テクトニクス

###### I I - 3 - 3 惑星の起源と形成過程の研究

- (a) 惑星形成論
- (b) 原始太陽系星雲での物質進化と隕石科学

###### I I - 3 - 4 地球惑星表層の環境と生物圏の物質科学

### I II 今後の重点課題とそれを実現する方策

#### I II - 1 地球惑星物質のキャラクタリゼーション

- (a) 放射光の利用

- (b) 分析技術
- (c) 地球外物質の研究

#### I I I - 2 地球惑星物質科学におけるシミュレーション

- (a) 鉱物の挙動のダイナミクスと地球内部の大規模変動のダイナミクス
- (b) 超高圧発生技術の開発
- (c) 計算機科学：第一原理MDとマントル対流計算

#### I I I - 3 地球惑星進化の物質科学

- (a) 地球惑星科学の新しいパラダイムの構築
- (b) 地球史を通じた生物活動と地球環境の相互作用の解明
- (c) 生命、地球、宇宙の起源へのアプローチ

#### I I I - 4 学界や社会に対する地球惑星物質科学の役割

- (a) 環境と資源の地球惑星物質科学
- (b) 地球内部の変動予測のための地球惑星物質科学
- (c) 自然史博物館の充実と地学の普及

#### I I I - 5 研究と教育を取り巻く環境の改善

## I はじめに

地球惑星物質科学とは、鉱物学・岩石学・鉱床学などから発展し、地球とそれを取り巻く太陽系を構成する物質の生成と進化過程の解明を目指す分野である。地球惑星物質科学においては、対象とする物質のミクロとマクロの性質を明らかにすることによって、時間とともに不可逆に進化する地球と太陽系の物質進化の過程を解明することを目的とする点において「逆問題」を解くことにはかならない。この分野の研究は物理学や化学、材料科学と共に研究方法を用い、これらの分野の発展に影響されつつ、また逆に貢献しつつある。

地球惑星物質科学は、これまで物質解析法に大きな発展があるごとにその新しい方法論（研究手段）を用いて大きく発展してきた。その例として1900年代のX線の発見による結晶構造解析法の開発、1960年代の電子顕微鏡の発展と電子プローブマイクロアナライザー（EPMA）の開発、1980年代からの放射光による結晶構造解析と微量元素蛍光X線分析などは地球科学に驚くほどの発展をもたらした。日本で世界に先んじて開発し、その技術が高く評価されているものに超高压合成技術がある。最近では、この超高压技術と放射光技術を組み合わせて、高圧下での物質の振る舞いをその場（*in-situ*）観察する研究が行われるまでに至り、地球深部の層構造と初期地球の形成過程の問題が解かれつつある。

周知のように、地球の動きを解きあかす基本理念としては1960年代のプレートテクトニクス理論の登場が、従来の考えを一挙に変化させ、地球進化のダイナミクスを解明する武器となった。地球惑星物質科学の21世紀に向けての動向も、やはり基本理念の新登場と、新研究手法の開発とに大きく関わる。最近登場した新しい基本理念としてニューグローバルテクトニクスともいるべきブルームテクトニクス理論がある。プレートテクトニクスが地殻と上部マントルの水平方向の動きを解く理論であるのに対して、ブルームテクトニクスは地球深部からのマグマのわき上がりという垂直方向の動きを考えるものである。垂直方向のダイナミクスの重要性は、超高压变成岩が発見されその中から高圧鉱物であるコーパイト（1）が見つかったことや、ダイヤモンド中の包有物として地下400km以深の起源物質である特異なザクロ石（メージャライト）（2）が発見されたことなどからも裏付けされている。プレートからブルームへという動きは21世紀に掛けてますます発展するであろう。地球や惑星の進化をさらに明かにする上で不可欠な地球惑星物質科学

における新しい技術である超高圧発生技術や放射光科学もますますの発展が期待されるであろう。

一方、地球惑星物質科学の重要な研究分野の一つに隕石科学がある。小惑星と隕石の反射スペクトルの研究から、隕石の多くが小惑星体から由来したものであることが明らかになり、隕石に残された組織や化学組成から原始太陽系での物質進化を明らかにする上で不可欠な情報を取り出すことに成功してきている。また、月や火星から飛来した隕石も発見され、それらの天体の進化についての物質科学的研究が精力的に行われ始めている。隕石の研究には無重力環境での物質の振舞いなどの研究を進める必要があり、この研究は宇宙利用と宇宙科学への貢献という意味でも重要である。

地球惑星物質科学の研究手法は大きく二つのカテゴリーに分類することができるであろう。それらは、第一に（1）地球惑星物質のキャラクタリゼーション、そして（2）地球惑星現象の実験的再現（シミュレーション）である。（1）の方法は、鉱物学・岩石学・鉱床学などの伝統的な手法であったが、近年様々な革新的実験技術が開発実用化され、キャラクタリゼーションの技術が格段に進歩した。（2）の研究は、物理学、化学の理論、実験の手法を積極的に導入しさらに、分野によっては逆にこれらに技術的貢献もしている。理論においては鉱物の構造・組織の「カオス」「フラクタル」という複雑系の研究、実験においてはメガバール（1Mbar; 100 GPa）の圧力を目指す「超高圧発生技術」などにおいて、地球惑星物質科学の研究が周辺分野の発展に寄与しつつある。

上記の（1）と（2）の研究のいずれにおいても、進化しつつある太陽系と地球惑星の現象を明らかにするという逆問題を解く点に特徴がある。地球惑星物質科学で取り扱う試料はすべて過去に地球や惑星が行ってきた振舞いの結果である。我々はこれらの試料について、一体過去に何が起ってこのような試料が残されたのかを過去にさかのぼってそのプロセスを解かなければならない。そのために、その解決に必要な技術や知識をあるときは自前で調達し、ある時は物理学や化学の分野から導入してきた。新しい学術の動向は各関連分野との共同により、進んで行くものである。我々はそのような新しい学術の動向を自ら創造し、また世界の動きに遅れることなく、問題の解決に向けて努力することが大切であろう。この冊子では、地球惑星物質科学の現状と今後の重点課題について論ずる。

## I I 地球惑星物質科学の現状

ここでは地球惑星物質科学の現状について、まず、（1）キャラクタリゼーション、（2）シミュレーションの二つのカテゴリーの研究について我が国におけるこの分野の進展を諸

外国での発展と対応させて述べる。さらに、地球惑星進化の物質科学における最近の10年間に大きな学問的発展が認められた研究分野について概説する。

## I I - 1 地球惑星物質のキャラクタリゼーション

鉱物学では、古く（17世紀頃）から、鉱物の化学組成といった化学的性質や、結晶外形や対称性などの物理的性質が詳細に研究され、鉱物の分類学が盛んとなり、またそれらの性質と生成環境の関連性などについて研究されてきた。第2次大戦後、鉱物学は、日本においても世界においても、大きな進展を遂げてきている。とくに、1980年代の2回の文部省科学研究特定研究（代表者：砂川一郎、丸茂文幸）によって、鉱物のミクロ物性とカイネティクスを明かにする鉱物物理学（Mineral Physics）の方法が我が国において始まり、その後米国を中心に世界の鉱物科学の主流になっている。これにともなって、赤外分光、ラマン分光、メスバウア分光などの鉱物の分光学的研究が盛んに行われることになった。以下に、（a）鉱物物性の研究、（b）鉱物・岩石の組織の研究、（c）キャラクタリゼーション手法の開発、に大別して、それらの現在の進展状況について述べる。

### （a）鉱物物性の研究

第2次大戦後、X線などを用いて、鉱物の原子配列の詳細が明らかになり、鉱物の物理的及び化学的な「通性」に対する理解が飛躍的に進むようになって来ている。現在では、単結晶構造解析は4軸単結晶回折計（3）が全国の多くの大学や国立研究所に導入され、解析システムの確立によって、日常的に使用できる程度に普及した。また、X線検出器の開発も進み、位置敏感比例計数管（PSPC）（4）、半導体検出器（SSD）（5）、イメージングプレート（IP）（6）などが開発された。これらの装置を用いたX線の解析システムが新たに開発され、X線散乱因子に波動関数が導入され、核外電子の分布や結合電子の状態が明らかにされ、X線回折を利用して熱振動の精密な研究（非調和熱振動解析）も行われている。一方、微小結晶に関しても、放射光の強力X線とラウエ法を用いることにより結晶構造解析が可能となり、数ミクロン以下の微小結晶の解析が可能となつた。また、リートフェルト解析法（7）が開発され、粉末X線解析に応用され、単結晶の得られない鉱物について高い精度で解析が可能になっている。さらに、原子間力顕微鏡（8）による表面での原子配列の研究が行われ始めている。

1980年代以降、赤外分光法、ラマン分光法、メスパウア分光法、核磁気共鳴法(NMR) (9)などの鉱物の分光学的研究が盛んに行われ、鉱物中の原子の微視的な振る舞いが次第に明らかになっている。さらに、顕微赤外、顕微ラマンの装置の改良により、鉱物の微小部分での解析も可能となってきた。一方放射光(10)を用いたEXAFS(11)、XANES(12)などの実験も盛んとなっている。これらの分光学的研究の結果、多くの鉱物の局所構造が明らかにされてきている。これらの研究の結果、地球や惑星を構成する主要な造岩鉱物の結晶構造の詳細が明らかにされている。

鉱物の熱測定もカルバー型双子高温微量熱量計(13)や示差走査熱量計(DSC)(14)などによって微量の試料の精度良い熱測定が可能になり、常圧で安定な鉱物のみならず多くの高圧鉱物の熱測定が行われ、比熱、エントロピー、エンタルピーなどの基本的な熱力学的物性量が求められた。さらにその結果を用いて、マントル物質の相境界の定量的決定が可能になり、地球内部の地震波不連続と対応させることにより、地温分布の推定が行われている。

#### (b) 鉱物、岩石の組織の研究

鉱物の内部組織(累帯構造など)や鉱物集合体としての岩石組織の研究は、これらの物質の成因や生成条件を解明するために(逆問題)、またこれらの物質がバルクとしてもつ物性(機能)を解明するために(順問題)、地球惑星物質科学の中で最も重要な問題のひとつである。これらの問題は、古くから光学顕微鏡を用いて研究してきた。1960年代頃から電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)を用いた微小部分の化学分析が可能となり、光学顕微鏡サイズでの化学的不均質性の研究が飛躍的に進展した。一方、さらに微視的なスケールでの組織については、第二次大戦後にX線などを用いた研究が盛んに行われてきた。1970年代に入ると、透過型電子顕微鏡による組織観察が可能となり、とくに、鉱物の形成後の熱や歪みによって形成される微視的な組織の研究が盛んに行われるようになった。これらの研究手法を用いて、鉱物の履歴を探り、さらに、それらを含む岩石や隕石の形成史を考察する研究も行われるようになってきている。

EPMAによる鉱物の累帯構造(15)の研究では特に、火山岩中の輝石や斜長石や変成岩中のザクロ石などの鉱物の累帯構造の研究が盛んに行われ、それらの鉱物の受けた熱的な履歴を読み取ることができるようになった。

### (c) キャラクタリゼーション技術の開発

鉱物の結晶構造、微細組織や岩石の組織・構造を研究する分野は、上で述べてきたように、様々な革新的装置の導入により格段に進歩してきた。ここでは80年代以降に、日本の研究者が中心になって世界に先駆けて行ってきたキャラクタリゼーションの手法の開発について述べる。

1980年代になって放射光が強力な光源として用いられるようになった。この強力な光源を用いて、赤外領域から硬X線領域にまたがる広い波長領域での分光学的研究が格段に進歩した。特に地球惑星物質科学の分野においては、放射光を強力なX線源として、数ミクロン以下の極微小試料のX線結晶構造解析、XAFS、XANES、微小領域の蛍光X線分析、ダイヤモンドアンビル高圧装置(16)やマルチアンビル高圧装置(17)を用いた高温高圧下での粉末X線回折による状態方程式の測定や相転移のカイネティックスの研究が進んだ。

1990年代になると革新的分析技術が実用化し、わが国の多くの研究室において二次イオン質量分析計(SIMS)(18)や誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MCS)(19)を用いて、微小部分の極微量元素の定量分析、同位体の二次元分布の測定が行われるようになった。特にオーストラリア国立大学において行われたSHRIMP(20)を用いたジルコンのウラン-鉛(U-Pb)年代の測定による最古(42.8億年)の鉱物の発見は注目すべき成果であった。わが国においては、隕石中の鉱物の酸素同位体やマグネシウム同位体の不均質分布などが報告された。また、天然および合成鉱物の極微量元素の濃度の測定が行われ、多くの微量元素の結晶とマグマの間の分配係数の測定が始まった。

## II-2 シミュレーションとしての地球惑星物質科学

### (a) 地球惑星物質の挙動や相変態についての実験によるシミュレーション

鉱物は温度圧力の変化に対して相変態をする。この相変態の研究特に実験的研究も、戦後飛躍的に進歩した。また相変態に伴う熱力学的な量の変化を測定できるようになった。特に1980年代になると、鉱物の相変態への統計力学的アプローチが成功し、相変態の理解が大きく進展するようになっている。

気体や液体から結晶への1次の相変態である結晶成長の研究は、成長のカイネティクスを連続的に観察するその場（*in situ*）観察法が発達した。その場観察法は水溶液結晶について利用されたが、その後高温での珪酸塩結晶の研究にも使われるようになった。この方法を用いて結晶成長理論と対比できる正確な実験データが得られるようになった。

月の岩石や隕石の再現実験や合成実験、蒸発実験、凝縮実験なども始まり、珪酸塩の気相からの合成実験も行われた。さらに高圧相の気相からの合成法としてCVD法（21）が確立され、ダイヤモンド薄膜が工具の強化皮膜として機械加工分野や半導体部品として電子工業分野において実用化されるに到っている。結晶成長実験が宇宙の無重力状態のもとで開始され、新素材の開発合成に適用され始めた。

高圧科学が導入され、高圧鉱物の合成とそのキャラクタリゼーションが行われ、高圧鉱物学とも呼ばれる分野が形成された。ダイヤモンドアンビル技術の導入によって、高圧下での鉱物の分光学的研究が盛んに行われた。放射光を強力X線源として利用することが可能になり、ダイヤモンドアンビル高圧装置やマルチアンビル高圧装置を用いたX線その場観察実験が始まり、高温高圧下で鉱物の相境界の決定、状態方程式の決定、相転移の速度論的研究が行われた。高温高圧下での弾性波速度、電気伝導度、熱伝導度などの物性のその場測定も行われた。また、高温下で溶融、結晶化、相転移を観察するその場観察の方法が開発実用化された。特に、高温X線観察や高温電子顕微鏡観察が可能になり、これを用いて相転移の動力学の研究が始まった。

#### （b）超高压下での実験によるシミュレーションと地球惑星の内部

上で述べたように、鉱物科学の研究にダイヤモンドアンビル高圧装置とマルチアンビル高圧装置が用いられ、地球の下部マントルから地球中心核までもが実験的研究の対象となった。ダイヤモンドアンビル高圧装置による超高压発生技術の進歩によって、200 GPaの超高压のもとで、水素の金属化が見いだされた。それとともに、多くの元素の超高压下での金属化の研究が進み、超高压下でヨウ素、ゼノン、イオウ、酸素などの絶縁体の金属化が見いだされた。また、レーザーを用いた加熱方式によって、温度精度に問題があるものの300 K程度の超高温発生と測温が可能となった。ダイヤモンドアンビル高圧装置を用いてメスバウア分光、顕微赤外分光、顕微ラマン分光を超高压下で行うことが可能となった。

マルチアンビル高圧装置がわが国で開発実用化され、670 kmの地震波不連続面に対

応する珪酸塩スピネル（22）のペリクレースと珪酸塩ペロブスカイト（23）への分解が実験的に明かにされ、その相境界が精密に決定された。また、下部マントル最上部までの条件で、マントル物質の融解関係が解明され、初期地球のマグマオーシャン（24）の分化、コマチサイトマグマ（25）の起源が解明された。金属鉄の融解実験と金属鉄-珪酸塩間の元素分配様式などが明らかにされ、高温高圧下での核マントル平衡という地球核の形成に関するモデルが提案された。

超高压発生技術と放射光が組み合わされ高温高圧X線その場観察実験が可能になった。高エネルギー物理学研究所の放射光実験施設において、高压X線回折装置（MAX80、MAX90（26））を用いた高温高圧X線実験が開始され、鉱物の相転移のその場観察、相転移速度の決定、相境界の精密決定、鉱物の状態方程式の精密決定がなされた。

衝撃波実験は主要鉱物のユゴニオ（27）から相転移を解明する研究、試料回収によって高圧相を合成する研究が行われ、さらに、衝撃波によるアモルファス化の研究なども長石試料などに対して行われている。これらの衝撃波実験は、静的高压で到達することができない極超高压を実現するためのみならず、新たな物質合成の手段として、また地球惑星科学において宇宙空間や惑星表面での衝突現象を解明するための有力な実験手段になっている。さらに近年では、衝撃波実験は火山噴火やマグマ水蒸気爆発の機構を解明するためにも利用されている。

### （c）地球惑星物質の計算機科学

計算機の進歩とともに、分子シミュレーション計算の方法が開発され、WMIN法（28）、MD法（29）、ab initio法（30）へと発展し、高圧相の結晶構造、弾性率、高温高圧下での融体の構造、融点などが理論的に予測され、実験の予測、実験不可能な条件での物質の振舞いの解明が可能になった。マクロな物性を説明する原子間ポテンシャルが求められ、これに基づいて関連する物理量の予測と外挿が可能となった。

## II-3 地球惑星物質科学の成果（パラダイムの構築に関連したもの）

地球惑星物質科学において、上で挙げた研究成果に基づいて、最近の10年間の間にはいくつかの大きな学問的発展が認められた。それらのいくつかについて以下で概説しよう。

### II-3-1 地球惑星物質の挙動

### (a) 結晶化学および結晶物理

結晶化学の分野では、第2次大戦以後のX線結晶学の成果を受け継ぐ形で、結晶構造の研究が進展してきた。

EXAFS、核磁気共鳴法（NMR）などのスペクトロスコピーの研究の結果、結晶の局所的な構造が明らかにされた。たとえば、造岩鉱物の全率固溶体結晶（31）の局所構造の研究から、それを構成する各陽イオンと陰イオンとの間の結合距離が、固溶体組成に関わらず、ほぼ一定であることが明らかになり、固溶体モデルの理解が進展した。また、秩序一無秩序変態の際の、陽イオンの局所的な秩序化が明らかになり、後述する相変態論の進展に大きな寄与をしている。

上で述べたように、MD法による計算などの計算鉱物学の進展により、地球惑星を構成する主要構成鉱物やマグマの構造の詳細、構造の温度圧力変化、相転移のメカニズム、アモルファス化など、原子レベルでの構造変化の詳細が解明されつつある。

### (b) 格子欠陥

格子欠陥の研究も進展し、造岩鉱物の転位構造が明らかにされてきた。転位構造と岩石の流動の関係も次第に明らかになりつつある。とくに、地球深部での流動を明らかにするための、ザクロ石構造やペロブスカイト構造化合物の転位構造の研究が進展している。積層欠陥（32）の研究では、マントルの主要構成鉱物であるカンラン石中にH<sub>2</sub>Oを含む層が発見されるなど、地球内部物質の欠陥構造の理解が進展した。

### (c) 相変態論

鉱物結晶の相変態論では、とくに構造相変態論では、ランダウ（Landau）の理論（33）に基づいた研究に大きな進展があった。複雑な造岩鉱物の相変態を表現するために、二つの秩序変数を用いてランダウ（Landau）展開（34）を行って成功を納めている。特に、長石、董青石などの鉱物の相変態の理解が進み、岩石や鉱物の挙動が理解されるようになった。一方、1次の相変態の典型である鉱物の結晶成長の研究にも大きな進展があり、その場観察実験や再現実験が進み、結晶成長の速度論が進展してきている。このような研究が隕石の成因論などに大きな影響を与えてきた。

### (d) 組織形成論

鉱物内の微細な組織の研究が、電子顕微鏡などの観察により進展し、分相や分解現象の理解が進んでいる。また、鉱物や岩石の組織の成因を明らかにするために非平衡熱力学的な解析を応用する研究も始まっている。これらの研究が主に複雑系としての組織につ

いての研究として発展してきたのに対して、多粒子系や多相系における相互作用を考慮した複合系としての組織についての研究の重要性も認識されるようになった。これらの研究は、火成岩などにみられる結晶サイズ分布の理解や変成岩における変形作用の理解などいくつかの成果が得られているが、系統的な組織解析法が確立されたわけではない。一方、S I M S やLAMICP-MSを用いた微量元素や同位体の2次元分布、顕微スペクトロスコピー（35）を用いた化学結合の不均一分布の測定といった、新しいキャラクタリゼーション機器による組織研究も始まっている。

系統的な組織解析のためには、キャラクタリゼーション手法（迅速かつ有効な組織記載、コンピュータによる画像処理、データベース化など）およびシミュレーション手法（パターン形成の科学に基づいた組織形成理論の構築、およびこれに則した室内実験、コンピュータシミュレーション技術の開発：例えば均質化法など）の確立が、今後の重要な研究課題の一つである。とくに前者は、これから鉱物・岩石の記載法として基礎的なものであり、新しいキャラクタリゼーション機器による組織研究にも欠かせない。また、X線CT法（36）やNMR法などによる岩石や隕石の3次元組織の研究も国内外でおこなわれるようになってきている。

## I I - 3 - 2 地球の形成進化とダイナミックス

### (a) 地球史初期物質の探索と初期地球の解明

始生代の地質体の研究が進み、西オーストラリアにおいて最古の鉱物である42.8億年の年齢をしめすジルコン（37）の結晶が発見された。さらにカナダのアカスタ片麻岩が40億年前という最古の年齢を示すことが明らかにされた。我が国においても、始生代の研究がすすみ、プレートテクトニクスが30億年以上前の始生代まで遡ることができることが明らかになった。

地球集積過程、核の形成過程、初期の地球のマグマオーシャンの過程の高温高圧実験に基づいた実験的研究や数値シミュレーションにもとづいた研究により、地球集積にともなって表層が融解しマグマオーシャンが形成され、それに伴って核の形成分離が進行したことが明らかになりつつある。またマグマオーシャンの固化の痕跡は、固化と同時に起こる対流と固化後のマントル対流による攪拌のため均一化され、消失してしまうことが明らかになった。

### (b) 超深部物質の発見と地殻マントル深部過程

地球の深部物質が天然の岩石に見出された。アルプスにおいて始めてショパン(Chopin)によって、高圧変成岩であるグラニュライトから石英の高圧多形であるコーサイトが発見され、地殻物質がこれまで考えられていたよりもはるかに地下深部に持ち込まれていることが明らかになった。この発見に引き続いて、中国からも同様のコーサイトの発見が相次ぎ、超高压変成作用という概念が確立した。このように地殻物質がマントル深く持ち込まれることなど、地殻の運動は想像以上にダイナミックであることが明らかになった。さらに、キンバーライト(38)に伴うダイヤモンド中の珪酸塩包有物(39)として、マントル遷移層(40)や下部マントル起源の高圧鉱物であるザクロ石(メージャライト)、マグネシオブスタイト(41)などが発見された。また、同様の珪酸塩包有物として下部マントルで安定に存在した珪酸塩ペロブスカイトが低圧相に変化したと思われるMgSiO<sub>3</sub>相(輝石)及びCaSiO<sub>3</sub>相がマグネシオブスタイトと共に存して見い出されている。これによって、今やマントル深部の物質を手にとって研究することが可能になっていている。

### (c) マグマ学、火山内部構造、火山プロセス、島弧の三次元モデル

東北、西南日本弧の火山岩類の微量成分、同位体成分の分析が進み、スラブ(42)の脱水による水の供給とともになうエッジマントル(43)の融解という島弧の火成活動のモデルが提案された。また、地質時代のある時期にはスラブの融解も進行し特異なマグマが形成されたことが指摘された。地震波のトモグラフィ解析(44)によって全地球規模の地震波速度の三次元不均質性が解明されつつあるのに続いて、東北日本弧の三次元構造の解明が地震学者によって明らかにされた。これによって、島弧の火山体下部の地震波反射面、地震波速度の低速度層(LVZ)(45)、地震波速度の高吸収帯(LQZ)(46)の存在が明らかになった。このような地震学的モデルに対して、物質科学的モデルが提案され、マグマ溜りの深さ、火山の構造と火山の根についての火山岩岩石学的理解が進んだ。さらに、いくつかの機関にICP-MSやSIMSなどの先端的分析機器が導入され、火成岩研究、実験岩石学的研究に適用されはじめた。またマグマ構造、物性についての理論的、実験的研究が進み、様々な領域でのマグマに関する研究を総合するマグマ学と呼ばれる分野が形成された。

#### (d) テクトニクス

地球規模の地震波速度の三次元分布が解明され、それを用いて地球内部構造の理解と地球のテクトニクスの理解が進んだ。そして、地球の深部過程として従来のプレートテクトニクスに対して、スラブの沈み込みに対応するコールドプルーム（47）、核マントル境界に起源をもつホットプルーム（48）の存在が指摘されプルームテクトニクスが提案された。この考え方は、従来地球の表面の現象の解釈にのみ適用され、地球の深部の過程を論じることができなかったプレートテクトニクスを超える新しい理論として今後の発展が期待されている。また地表のテクトニクスをマントルトモグラフィに基づいて議論できるようになった。

南極、スリランカ、インド、ヒマラヤの詳細な地質調査が行われ、それに基づいてテクトニクスの研究が進み、南極とインドの地質構造の対応づけが行われ、ゴンドワナ大陸（49）の復元など大陸移動の確証が得られた。

変成作用の研究においては、詳細な共生鉱物の熱力学的解析と鉱物の累帯構造の解析にもとづいて、精度の高い P T t (温度、圧力、時間) 履歴の復元が可能になった。また、試料の応力解析を導入することにより、P T t σ (応力) 履歴の解析が行われた。

### I I - 3 - 3 惑星の起源と形成過程の研究

#### (a) 惑星形成論

惑星形成過程に関する実験的研究、理論的研究が進んだ。実験的研究としては、地球型惑星や外惑星の月の起源を論ずるために珪酸塩や氷 ( $H_2O, CO_2, NH_3$ ) の低速衝突実験、衝撃波実験装置を用いた衝突破壊実験、珪酸塩の蒸発および凝縮実験が行われた。理論的研究として、計算機を用いた数値シミュレーションが行われ、地球の集積は水素を主とする原始大気がある場合にはその保温効果によって、原始大気が散逸した場合には水蒸気大気によって、原始地球の表層部が融解し大規模なマグマオーシャンが形成されることが明らかになった。

#### (b) 原始太陽系星雲での物質進化と隕石科学

南極のやまと隕石（50）の発見を契機として、わが国は世界一の隕石保有国となり、隕石学の発展に大きく貢献した。隕石の岩石学的、鉱物学的研究とともに、二次イオン質量分析計 (SIMS) による研究によって、酸素同位体、マグネシウム同位体の不均質分布

が見いだされた。また炭素質隕石中のダイヤモンドやSiCの粒子中で酸素、窒素、ゼノン(Xe)の大きな同位体の異常が見いだされ、太陽系の形成以前の歴史をもつプレソーラー粒子(51)として注目された。月起源や火星起源の隕石(SNC隕石(52))などの発見によって、月や火星の地殻の研究が行われ、それらにもとづいて、月や火星の構造のモデル化が可能になった。

#### I I - 3 - 4 地球惑星表層の環境と生物圏の物質科学

生命の起源と進化、生物と地球環境との相互作用への物質科学的アプローチが始まった。わが国において宇宙における有機物の起源の研究が行われた。生命の痕跡を始生代に探索する試みがわが国においても行われた。始生代の大気の進化の研究が、この時代の土壤を研究することによって行われ、始生代前期にすでに酸素がかなりの量生成していた可能性が示唆された。

マグнетाइトなど微生物の作り出す様々な鉱物の研究が行われ、生命の起源と進化、古環境の研究に新たな視点が示唆された。

NASAによって火星起源の南極隕石中に、有機物や炭酸塩などの生命起源の可能性のある物質や組織が報告され、にわかに火星など地球外に生命存在の可能性を探る機運が盛り上がっている。また、隕石研究を生命の起源の側面から行うことの重要性が認識された。

### I I I 今後の重点課題とそれを実現する方策

#### I I I - 1 地球惑星物質のキャラクタリゼーション

##### (a) 放射光の利用

放射光は様々な周辺分野の発展に目ざましい影響を与えている。地球惑星物質科学への貢献も例外ではない。X線のその場観察による高温高圧下における鉱物の挙動のダイナミクスは放射光の利用により大きな進歩が見られた。放射光の特性を活かして従来のX線源では不可能であった鉱物学、結晶学の分野の研究が可能になった。放射光科学の進歩は目覚ましく、現在稼働している高エネルギー加速器研究機構の物質構造科学研究所の放射光実験施設(PF)に加えて、平成9年度から播磨科学公園都市に建設中であったSpring8(53)が稼働することになった。Spring8はPFよりも大型の高輝度放射光施設で、新たな実

験が可能になると期待できる。そのひとつに硬X線マイクロビームによる走査型顕微鏡の計画がある。PFでは計測に利用できる輝度のマイクロビームは高々数ミクロン程度であるのに対し、Spring8で計画中のものは0.1ミクロンの分解能の集光ビームを目指している。この計画では透過X線の情報のみならず蛍光X線、回折X線などを検出することができる。更に波長可変なX線を用いることにより極微小領域のEXAFSの測定が可能になる。鉱物のその場観察はこのような分解能のマイクロビームを用いることにより、従来平均的な情報しか得られなかつたのに対し、相境界、相転移、離溶などの研究において原子論的なスケールに迫る知見が得られるとともに、宇宙塵などの極微小の地球外物質の研究にも貢献することが期待できる。さらに、高温高圧極限状態におけるX線その場観察実験による相境界の精密決定、相転移反応のカイネティクスの研究、高温高圧でのメスバウア分光（54）、紫外線（UV）による表面反応の研究の進展が期待されている。これらの点からSpring8を積極的に活用し、独自の地球惑星物質科学ポート設置に向けて努力する必要がある。

### （b）分析技術

岩石鉱物試料についての詳細な化学組成は基本的データとして最も重要であり、これなくしては地球惑星物質科学の研究は果たせないし、より高精度の分析法の開発と応用は新しい研究分野とパラダイムをもたらすと言っても過言ではない。実際、従来の湿式分析法に対して、1960年代の後半に電子線を応用した新しい分析法である電子プローブマイクロアナライザー（EPMA）（55）が登場し、その優れた微小領域分析能、非破壊分析能、迅速性、定量性が実用化されると鉱物科学分野の研究者はこぞってこの分析法を利用した。その後の四半世紀における鉱物科学の急速な発展はコンピュータの進歩に支えられたEPMAの存在に依っているところが多い。しかし、万能に見えたこのEPMA法もパーセントオーダーの主要重元素分析には威力を表すが、軽元素分析、同位体分析、微量元素分析は行え得ないという欠点を持つ。ところが、地球惑星物質中の微量元素、軽元素、同位体のデータこそは、今後の地球惑星物質科学分野の発展の基礎となる可能性が最近ますます認識されてきた。微量元素はそれを含む鉱物の起源と生成環境及びその変遷過程を明瞭に反映していることが多いので、その精密かつ迅速な分析は重要である。軽元素も鉱物が成長した環境や系全体が解放系か閉鎖系かの情報源であり、同位体は時間に関する情報をもたらし、また元素の振る舞いに関する重要な情報源である。これらのデータからは地球はもとより、宇宙の全く新しい景観を組み立てることすら可能である。

現在、微量元素分析、軽元素分析、同位体分析に適した分析法として二次イオン質量分析計 (SIMS) やレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計 (LAM-ICP-MS) (56) が実用化されて、各研究機関に導入が始まっている。特に、SIMSは一次イオン（酸素イオン、セシウムイオン、金イオンなど）を研磨試料表面の微小部に照射して、発生する二次イオンを質量分析する手法で、微小領域分析(ミクロン程度)、微量元素分析(ppm)、全元素分析（水素からウランまで）、深さ方向分析（分解能50Å）、同位体分析が可能である優れた分析機器である。しかし、機器の高価格と維持費の高さの他、定量分析の困難さなどの欠点も多い。LAM-ICP-MSは従来液体試料分析に使用されてきたICP-MSに、レーザーによる固体試料掘削装置を合体させた機器で、固体試料の表面に30μm程度に絞ったレーザービームを照射し、そこから飛散する微細な試料片やガスをアルゴンガスによってICP部に導いてプラズマ化して質量分析する装置である。研究機関への導入が始まったばかりの分析法であるが、元素の検出感度はppbのオーダーで極微量元素の分析に適しており、次世代の局所分析法の主流を担うと目されている。しかし、分析可能な元素種はベリリウム以上の元素に限られることと同位体分解能に限界がある点ではSIMSに劣るが、多元素迅速定量分析に優れ、数十元素のデータを1分以内で測定できる点、試料の前準備に手間が掛からないことなどの利点も多い。また機器が安価であることと、取り扱いが容易である点からは今後多くの研究機関に導入される可能性が期待される。特に、地球惑星物質科学分野のためには、レーザー掘削システム (LAM) を偏光顕微鏡及び反射顕微鏡に組み込んで、試料上の分析領域を確認しながら、定量分析できるシステムを完成させることが重要である。

上記の微量元素分析法の他に、諸外国では加速器からのMeV（百万電子ボルト）領域の高エネルギーイオン線を利用したPIXE (Proton Induced X-ray Emission : プロトン励起X線放射) 法 (57), RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry : ラザフォード後方散乱分光) 法 (58), ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis:エラスティック反跳原子検出分析) 法 (59), NRA (Nuclear Reaction Analysis:核反応γ線分析) 法 (60) などの各種のイオン線分析法 (Ion Beam Analysis: IBA法) が普及しつつある。

上記のイオン線分析法 (IBA法) は各々特色を持つが、一つの試料照射室に種類の異なる複数の検出器を組み込むことにより、幾つかの分析法で同時に測定することが可能である。例えば、RBS法とPIXE法を組み合わせた場合、RBS法では軽元素の測定を行い、

PIXE法では重元素の測定を行うことができる。このような異なる手法による同時測定が行える点が、IBA法の優れた点と言える。しかし、日本ではIBA法の地球惑星物質科学への応用研究はほとんど開発が進んでいない。IBA法の開発が特に盛んな国はオーストラリア、カナダであるが、この二国は開発すべき資源が豊富にあり、その探査のために鉱石中の極微量元素・軽元素の迅速定量分析を行う目的でIBA法が発達した。最近では $\mu\text{m}$ 径以下のマイクロイオン線による二次元分析や、波長分散法によるPIXE法なども試みられ、これらの国と日本との差は拡大する一方である。IBA法には、ここで記述したものの他にも多くの有用なIBA法があり、また加速器自身を質量分析器として使用してppt( $10^{-12}$ )レベル以下の超微量元素分析を行う加速器質量分析法 (Accelerator mass spectroscopy ; AMS) (61) も急速に開発が進められている。これらの新しい分析法の評価と試験を行い、将来への基盤を作つておくことは重要であろう。

### (c) 地球外物質の研究

地球外環境での物質探索は、地球惑星物質科学に新たに大きな夢をもたらしている。鉱物学は、元来隕石などを別にすれば地球環境に存在する鉱物群の探索、記載、分類から始まった。宇宙時代の到来は、宇宙、惑星環境での新物質群の発見の大きな可能性をもたらし、天然の鉱物の美に感動した経験のある多くの鉱物学者に大きな夢を与えていた。このような来るべき宇宙探査の時代に対して、回収試料の精密キャラクタリゼーションを可能にする装置の開発研究、リモートセンシングによる惑星表面物質のキャラクタリゼーション技術開発などに対して地球惑星物質科学の分野が積極的に貢献することが重要である。

隕石の研究も新たな飛躍の可能性を秘めている。隕石の組織は、隕石が受けた様々な履歴を記録している。その中で隕石が他の天体と衝突した際の衝撃により形成された様々な組織の研究が電子顕微鏡を用いて行われてきた。そして、部分的に融解して生じたガラス組織、長石がアモルファス化したマスケリナイト (62) などが調べられ、衝撃、衝突現象の定量化にむけて研究が進んでいる。また、衝撃によって形成された様々な高圧鉱物が衝撃を受けた隕石中に見い出されている。隕石中に発見された高圧鉱物はカンラン石の高圧多形である変形スピネルとスピネルがそれぞれワズレイト (Wadsleyite)、リングウダイト (Ringwoodite)、また高圧で安定なMgSiO<sub>3</sub>成分に富むザクロ石はメジャライト (Majorite) と命名されている。

このような高圧鉱物を隕石中に探索する試みは、最近わが国の研究者によつても精力的

に進められつつある。そして最近、下部マントルの主要な高圧鉱物で輝石組成を持ったイルメナイト相とペロブスカイト相が世界に先駆けてわが国の研究者によって発見された。この発見はわが国の地球惑星物質科学の水準の高さを物語っている。

### I I I - 2 地球惑星物質科学におけるシミュレーション

#### (a) 鉱物の挙動のダイナミクスと地球内部の大規模変動のダイナミクス

地球はその誕生から現在に至るまで、絶えず大規模な物理、化学的変動を続けてきた。その変動はプルームテクトニクスと言う言葉で表現され始めている。このような地球の大規模変動は、地震現象や火山現象を引き起こし、人類の生存に大きな影響を与えていた。このような地球の内部の大規模変動は観測データに基づく現象論的研究が重視される傾向があるが、現象の本質的な理解のためには、地球内部を構成する物質の動力学的挙動から解明しなければならないことは自明である。

沈み込んだプレートは変形流動し、マントル内部の二つの領域すなわちマントル遷移層とマントルと核の境界のD”層(63)に集積する。マントル遷移層に沈み込んだプレートはここで大規模に変形し滞留する。このプレートの大変形の原因として物質の相転移とともに超塑性や少量の水の存在下での鉱物の軟化などが考えられる。このように沈み込んだプレートは一方で大変形を起すのに対して、他方でその内部において深発地震(64)の原因となる破壊現象も存在する。マントル物質の相転移はマントル深部での断層破壊(深発地震)の引金になっている可能性がある。一方で変形流動を促進し、他方で破壊の引金になるという一見矛盾した作用をする相転移の変形流動破壊への影響の多様性は、温度、応力、歪み速度などの因子によって統一的に説明できるであろう。地球内部のダイナミクスを解明するためには、このようなプレートを構成する物質の高温高圧下での変形流動破壊様式の解明が不可欠である。具体的には(1) 地球惑星内部物質の変形流動則とその圧力依存性の研究、特に放射光を用いた高圧下での変形のその場観察、(2) 応力場での高圧鉱物の選択配向の研究、(3) 高圧下での拡散と流動に対する水の影響の研究、(4) 変形と破壊に対する相転移の影響の研究、すなわち超塑性と破壊(深発地震)の研究などを強力に推進する必要があろう。

#### (b) 超高圧発生技術の開発

高圧研究の目ざましい発展によって、今や 100 GPa 領域での物質の構造、分子、原

子の結合状態の変化、原子の電子軌道の変化についての知識が急速に明かになりつつある。そして、ヨウ素、ゼノン、水素などに見られるように、常圧で非金属のいくつかの物質が超高压で金属化することが明かになりつつある。このような超高压下で見いだされた現象は100GPaの鉱物学、化学、物理学が常圧のそれとははるかに異なることを示している。超高压での物質科学は今後の夢のある分野である。現在の静的高圧発生の圧力限界は約400GPaと言われている。また、衝撃波実験では数TPaの超高压の発生が可能になっている。このような超高压発生技術の進歩によって、地球中心部の実験的研究から木星型惑星内部に研究を進めることも可能になりつつある。

#### (c) 計算機科学：第一原理MDとマントル対流計算

計算機科学も計算機の目ざましい進歩によって、今後さらに発展することが期待される。地球を構成する複雑な珪酸塩鉱物に対してもab initio計算が可能になるのは時間の問題であろう。分子動力学計算の手法によって様々なマントル鉱物の高温高圧下での構造と物性を高精度で求めることが可能である。この方法は、高温高圧下での物性測定実験に指針を与えると共に、実測することが困難な超高压条件での熱的弾性的性質を予測することができる。このような物性シミュレーションに基づいて地球惑星深部の化学組成や温度分布などを解明することが可能である。

一方、マントルの三次元対流の計算によって、マントル遷移層におけるスラブの滞留と下部マントルへの崩落が数値的に再現されつつある。しかしながら、このモデルは比較的簡単な粘性流体のモデルにもとづいた現象論的なものであり、マントルの流動則の物理に基づいたものではない。今後、ミクロな鉱物物性を反映する分子動力学計算に基づいたマントル物質の流動則を基礎にしたマントル対流の計算が可能になろう。

### I I I -3 地球惑星進化の物質科学

#### (a) 地球惑星科学の新しいパラダイムの構築

新しいパラダイム（理論）は技術の革新にともなってもたらされてきた。地球惑星科学における一つのパラダイムはプレートテクトニクスであった。この理論は、海底の磁気の縞模様の発見を契機に提案された。一方、この理論を越えるより新しい地球観が、地震波トモグラフィにみられる1990年代の地震学の革新によって、形成されつつある。この新しい地球観はブルームテクトニクスとよばれ、地球深部の三次元的な地震波速度不均質

性にもとづいて、地球深部のダイナミクスを解釈しようとするものである。これによって、冷たいスラブ物質の核一マントル境界への崩落と核一マントル境界からの高温の巨大ブルームの上昇という地球内部のダイナミクスの基本的な描像が見えつつある。しかしながら、このようなブルームテクトニクスの考え方は、いまだ初步的な段階にある。現在の限界を解決し、より鮮明な地球内部の変動のダイナミクスを説明するポストブルームテクトニクスの理論を生み出すには、さらに新しい技術的革新が必要となろう。この技術革新とともに、なう地球内部の理解が格段に進歩する可能性のある分野は、第一に地球惑星物質科学における地球深部物質の拡散、流動、反応機構などミクロの過程を解明する分野、第二に惑星探査などの惑星研究に基づいた地球内部の比較惑星学的研究の分野であろう。前者は未だ初步的な状態にある地球内部運動論を、原子論的なレベルから理解することを可能にするのに対して、後者は地球型惑星のグローバルな進化様式の比較によって地球内部過程をより正確に理解するために貢献するであろう。これによって、原子論的な理解に基づいた地球内部変動と進化を惑星の進化過程の中で明かにすることができます。

#### (b) 地球史を通じた生物活動と地球環境の相互作用の解明

21世紀を目前にして、人類の生存にとって地球環境の保全の問題が大きく注目されている。このような人類活動を含む生物活動と地球環境との相互作用を正しく理解するためには、現在の短い時間断面で観測するのみでは不十分である。地球史を通じて生物活動は地球の内部および表層部の環境に影響を受け、さらに影響を与えてきた。地球内部、地球表層部そして地球大気の環境と生物活動がどのような相互作用をしてきたのかを解明することが、生命を育んでいる地球システムのダイナミクスを解明するために不可欠のものである。この研究は過去に起った種の絶滅と生物の爆発的増加などに見られる生命の発生と進化の大きな問題を解明するためにも不可欠である。

#### (c) 生命、地球、宇宙の起源へのアプローチ

生命の起源、地球の起源、宇宙の起源は人類にとって本質的課題である。地球惑星の物質科学のあらゆる手法を動員してこれらの問題の解明を目指すことは、今後の地球惑星物質科学の重点課題の一つである。具体的には、地球の起源に関して最古の鉱物、岩石を探索し、記録が抹消されたかに見える冥王代の地球環境を解明すること、生命の起源に関しては、最古の生命化石（の痕跡）の探索とアミノ酸などを始めとする生命関連有機物の生

成条件を解明することなど生命進化の解明を目指した物質科学的アプローチを行うこと、また、二次イオン質量分析計（S I M S）や誘導結合プラズマ質量分析計（I C P - M S）などを用いて原始的隕石に初期宇宙の痕跡を探索することが重点課題である。また、来るべき我が国の宇宙惑星探査に対して、回収試料の精密キャラクタリゼーションを可能とする研究支援を宇宙惑星探査プロジェクトに対して保証することも重要である。

#### I I I - 4 学界や社会に対する地球惑星物質科学の役割

##### （a）環境と資源の地球惑星物質科学

21世紀を目前にして、資源枯渇への対応、人口の爆発的増加、環境汚染や温暖化、酸性雨対策など現在ほど環境保全と地球資源問題に対して国民の関心が高まっている時期はない。このような時代に直面して、地球惑星物質科学の分野においても、これらの国民の関心と要求に対して積極的に対応する必要がある。

従来、鉱物科学で扱われてきた風化、変質の研究は環境汚染や酸性雨による自然破壊や建造物の腐食に対する研究にも大きく貢献している。さらに、核廃棄物の安全な貯蔵と処理の技術開発もこれまで以上に重要になっている。これまでも核廃棄物をガラス中に固定する方法、また、磷酸塩鉱物や珪酸塩鉱物中に放射性元素を固定するSYNROC(65)などの方法が提案してきた。これらの方法は核廃棄物処理のための新材料開発に関して鉱物科学が大きく貢献している例である。鉱物科学において詳しく研究されている鉱物と熱水の反応過程の研究は、今後ますます重要な核廃棄物の処理と貯蔵技術の改善に大きく貢献し得るものと期待されている。さらに、きれいなエネルギーとしての太陽エネルギーの実用化のための太陽電池の材料開発研究なども、地球惑星物質科学の分野が貢献し得る。

火山や地震などの防災の科学においても地球惑星物質科学は重要な役割を担っている。地震は岩石の破壊が原因となっている。したがって、地震現象の理解と地震予知の実用化には、観測網の整備のみでは不十分であり、現象論的な破壊の数値モデルを作ることではなく破壊する岩石の破壊強度、摩擦係数、弾性率などの諸物性の解明に基づいた本質的なモデルを構築することが不可欠であろう。また活断層の運動に関しても、断層面の物質科学的手法による研究が一層重要になっている。

このように、地球惑星物質科学は人類の生存のための不可欠な科学という重要な側面を持っている。地震と防災の物質科学、生体の物質科学すなわちバクテリアなどの生体の作

る鉱物の研究とその過程の有効利用、地球と地球外天体の資源の探索と評価、環境汚染環にたいする保全の研究などの分野で地球惑星物質科学の重要性がますます大きくなっている。

#### (b) 地球内部の変動予測のための地球惑星物質科学

人類の生存環境の変動の解明のためにも地球内部の変動の様式を解明することは不可欠である。地震や火山活動の変動は、地球内部のグローバルな物質移動と運動が原因と考えられるが、その詳細については現在のテクトニクスでは説明が不可能である。また気候変動の原因となるエルニーニョなどの海流変動と海嶺の活動の変動との関係も指摘されている。このような我々に身近な変動現象を地球内部の運動や物質移動にもとづいて説明するには、ブルームテクトニクスをさらに進めた地球内部運動の理解が不可欠である。このためには、地球内部物質の流動則、拡散、反応プロセス、反応速度などのカイネティクスを解明することが基礎になろう。そして、このような物質科学的知見にもとづいた新しいグローバルテクトニクスを構築することが求められている。

#### (c) 自然史博物館の充実と地学の普及

現在学校教育のカリキュラムの変更とともに、様々な現象が起こっている。特に、小、中学校については、理科のカリキュラムの変更によって、教科内容が変化し宇宙地球関係で鉱物や岩石に関するものが少なくなっている。また、高校における理科の選択方式の変更と教科内容の再編成で「地学」を学ぶ機会がますます減少している。

このような学校教育の現状を改善するためには、地学教育を行うことができる理科教員の養成とともに、「観察を中心とする自然科学」の教育を補完する自然史博物館及び資料館等の施設が不可欠となっている。また、高齢化社会を目前にして、生涯学習に向けての普及教育システムの構築が急務である。このためには、博物館が生涯学習の地域センターになる必要がある。現状はほんの一部の博物館をのぞいて研究者や専門の学芸員が少なく、博物館を利用しての教師による宇宙・地球関連の授業展開の機会が少なく、そのカリキュラムもない。従って、既存の自然史博物館を人的に充実し、さらに新たに設置するよう働きかける必要がある。

自然史博物館は地球惑星物質科学の普及・教育と研究の中心になるとともに、研究の基礎となる貴重な標本を保管し、利用に応えるべく、標準試料センターとしての役割も担わ

なければならない。今日、研究手法の進歩によって研究者からの地質標本の利用希望が高まっている反面、野外での収集は様々な環境の変化によって年々困難になっている。自然史博物館では様々な地質標準試料を作成し、研究者に提供するために一般に広く公開可能なデーターベースを確立することも重要である。このような点で全国の博物館のネットワーク化によるデーターベースの共有は今後の重要な方向である。

わが国には市民や学生が利用できるデーターベースは全くない。教育システムと同様現在の閉鎖的な現状を改善する必要がある。

### I I I - 5 研究と教育を取り巻く環境の改善

近年、地球惑星物質科学を取り巻く研究・教育環境に大きな変化が生じている。長らくきびしい状態に置かれてきた大学、国公立研究所等の研究環境の改善がようやく行なわれはじめた。特に、平成7年に制定された科学技術基本法に基づいて、平成8年度からむこう5年間にわたって、科学技術についての基盤整備が行なわれることになっている。しかしこれらの基盤整備のための財政的支援が、地球惑星物質科学のような基礎分野にも十分に行き渡るのかどうか、またこの基盤整備を通じて各研究機関における若手研究者や研究支援者の養成と確保を十分に行なうことができるのかどうか、我々は十分注目していく必要がある。

また数年前から、大規模国立大学において大学院の整備・拡充を目指した大学院重点化が進行しており、その他の大学においても学科の再編や博士課程の設置など、戦後最大規模の教育改革が進みつつある。その結果、これまでの伝統的な「地質学鉱物学」といった学科名や「岩石学、鉱物学、鉱床学」といった講座名に代わって、新たに「地球惑星科学」といった専攻名や「地球物質学、地球惑星物質学」といった講座名が生まれてきている。我々はこうした状況の中で、カリキュラムその他の面で、これまでの伝統を生かしつつ、新たな地球惑星物質科学への転換をどう進めていくか、が問われている。

さらに、我々に身近な学会活動を見てみると、数年前から地球惑星科学関連分野の一つの結集の場として、地球惑星科学関連学会合同大会が開催されるようになってきた。我々地球惑星物質科学を推進する立場にある者としては、今後そうした場で地球惑星科学の他分野との交流・協力関係をどう築いていくかを十分に考えていかなければならない。

上記のような現状を踏まえ、今後以下のような方策を展望していく必要がある。

- 1) 各研究機関における地球惑星物質科学関係の研究者が相互に情報の交換と協力関係の

強化に努めて、科研費の申請やC O E（センター・オブ・エクセレンス）申請等を通じて研究基盤の充実を計る。

- 2) 若手研究者の育成のために、大学院生やオーバードクターの研究条件の改善を更に関係機関にはたらきかけると共に、彼らを海外を含めた他研究機関との共同研究に積極的に参加させ、異なった思考法に接する機会ができるだけ持たせる。
- 3) 大学における研究・教育体制の改組に伴い、新たな地球惑星物質科学像に見合った物質科学の基礎教育を十分カリキュラムに反映させると共に、物質科学分野からの学生の流入も容易にするような大学院入試制度を考える。
- 4) 地球惑星物質科学関係の学会相互の交流と連携を計ると共に、地球惑星科学の他分野との交流を深め、同時に地球惑星物質科学の立場をアピールする場を積極的に求める。
- 5) 我が国の地球惑星物質科学が世界をリードして行くために必要な施策および設備は以下のようなものである。これらの装置を国内の複数の拠点に配置し、自由な競争による研究と教育活動の活性化に努める必要がある。

#### （1）複数の研究拠点の設置

我が国においては、地球惑星物質科学に関して岡山大学固体地球研究センター、東京大学地震研究所、通産省地質調査所などが重要な研究拠点となっている。また、関連する研究機関としては、科学技術庁無機材質研究所、共同利用機関としての物質構造科学研究所（旧放射光実験施設、P F）、放射光科学研究所（S p r i n g 8）などにおいて、地球惑星物質科学の研究が行われている。しかしながら、地球惑星物質科学の研究の拠点としての役割を担っているのは、岡山大学固体地球研究センターのみであり、地球惑星物質科学を推進するには全く不十分である。一方、諸外国の例をみると、米国ではカーネギー地球物理学実験所、ニューヨーク州立大学など、ドイツではマックスプランク研究所やバイロイト大学など地球惑星物質科学に関する複数の研究拠点が存在する。我が国の経済力と研究者人口から考えると地球惑星物質科学に複数のC O Eが不可欠である。鉱物物理学、超高压発生技術開発、実験惑星科学を研究対象とする第2、第3のC O Eとして地球惑

星物質科学研究センターを設置し、我が国においても一極集中ではなく複数の拠点の間での活発な競争による研究の活性化を促進することが望ましい。

わが国の宇宙開発研究は、惑星探査を実施できる能力を備え、小惑星サンプル回収計画などに見られるように、今後は惑星探査にともなう回収試料の精密定量分析を行うことが重要な課題になっている。このような地球外試料の各種精密分析（キャラクタリゼーション）を可能にするためにCOE構想に基づく惑星物質分析センターを設置することが望ましい。

(2) 我が国の地球惑星物質科学が世界をリードして行くために必要な設備は付表のようなものである。これらの装置を国内の複数の拠点に配置し、自由な競争による研究と教育活動の活性化に努める必要がある。

#### 付表

わが国の地球惑星物質科学分野が世界をリードするために研究拠点に必要な設備群

##### 装置名

X線構造解析装置

透過電子顕微鏡 (TEM)

走差電子顕微鏡 (SEM)

X線マイクロアナライザー

トンネル顕微鏡

顕微ラマン分光測定装置

顕微赤外分光測定装置

二次イオン質量分析計

レーザーアブレーション誘導結合

プラズマ質量分析装置

各種レーザー光源

衝突実験装置

高温高圧X線回折装置

各種高温合成炉

高温高圧合成装置

各種単結晶作成装置

各種真空蒸着装置

極微細加工装置

磁化率測定装置

マイクロ波特性測定装置

核磁気共鳴測定装置

電気伝導度測定装置

熱物性測定装置

多重極限環境発生装置

各種表面分析装置

ワークステーション

## 用語の説明

- (1) コーサイト :  $\text{SiO}_2$  の化学式をもつ石英の高圧相。L. Coes(1953)が初めて500~800 °C、3.5GPaで人工的に合成したが、その後1960年にはアリゾナの隕石孔から、さらに1984年にはアルプスの超高压変成岩から、それぞれ天然のものが発見された。
- (2) メージャライト :  $\text{Mg}_3(\text{Mg},\text{Al},\text{Si})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$  の化学式をもつ高圧で安定なザクロ石。Siの一部が6配位であることで特徴づけられる。A.E.Ringwood et al.(1966)により、900 °C、11GPa以上で合成されたが、1970年に衝撃を受けた隕石中から、また1991年にはキンバライト中のダイヤモンドから天然のものが発見された。
- (3) 4軸単結晶回折計 : X線や中性子回折法により結晶構造を決定するため、単結晶からの積分回折強度を測定するための装置。試料を回転させる独立な3軸と計数管位置を決める軸の4軸がある。
- (4) 位置敏感比例計測管 : 一次元の比例計数管で直線型や湾曲型をしたものがある。X線強度が一次元検出器に同時に測定できるので、高温高圧実験や物質の状態変化を観察する実験に使用される。
- (5) 半導体検出器 : GeやSiなどの半導体素子を用いた放射線計測器。エネルギー分解能に優れていて、回折強度の測定や元素分析に用いられる。
- (6) イメージングプレート : 特別な蛍光体を添加した粉末結晶体をプラスチック板に塗布した二次元のX線検出器。短時間に多数の回折強度の測定ができる。
- (7) リートフェルト解析法 : 粉末回折データを用いて格子定数や結晶構造の精密化を行う方法。回折線の積分強度でなくプロファイル強度を用いるので、反射の重なったデータも活用でき解析精度がよい結果が得られる。
- (8) 原子間力顕微鏡 : 探針の先端の一つの原子と試料表面の原子との間に働く原子間力を測定して、試料表面の原子尺度の構造を観察する顕微鏡。
- (9) 核磁気共鳴法 : 分子や原子中の原子核スピニから生ずる核磁気モーメントは交流磁場中で核磁化の励起(共鳴)を起こす。試料の同定や化学構造の情報が得られる。
- (10) 放射光 : 光速近くに加速した電子が磁場により進行方向が曲げられるとき、その接線方向に沿る光。広領域の滑らかなスペクトル分布や強度が極めて強いなどの特徴を持つ。
- (11, 12) EXAFS, XANES : X線の吸収端から高エネルギー側約1000 eVに見られるX線吸収微細構造で、吸収端から数十 eVまでをXANES、それより高エネルギー側をEXAFS、両者を合わせてXAFSという。XANESからはX線を吸収した元素の電子状態や配位の対称性、EXAFSからはその元素の配位数や原子間距離、熱振動などの局所的な情報が得られる。気体、液体、固体に適用できる。
- (13) カルベー型双子高温微少熱量計 : 600~1500 °C程度の高温下で、数mgの微少試料の熱量を測定する熱量計。E. Calvetによって開発された。各種珪酸塩鉱物の生成エンタルピーなど、地球惑星物質科学の基礎となる高精度の熱力学データを得るために用いられている。
- (14) 示差走査熱量計(DSC) : 試料と共に、加熱によって異常熱変化を示さない基準物質(アルミナなど)を電気炉中で一定速度で加熱して、両者の間に生じる温度差を測定し、試料の熱的特性を解析する機器。地球科学的試料の脱水現象、相転移現象などの研究に広く用いられる。

(15) 累帯構造：鉱物の中心部から周縁部にかけて、化学組成や不純物の含量などが変化している構造のこと。溶液から鉱物が結晶化する際の温度、圧力条件等が変化することによりできると考えられる。

(16) ダイヤモンドアンビル高圧装置：一対のダイヤモンド単結晶を対向させて用いる超高压発生装置。ダイヤモンドがX線などに対して透明であるため、超高压下での種々の物性測定に用いられる。現在、400GPaに達する静的圧力を発生しうる。

(17) マルチアンビル高圧装置：複数（通常6個または8個）のアンビルを用いて圧力を発生する装置。キューピックアンビル高圧装置、MA8（6-8）型高圧装置などがある。

(18) 二次質量イオン分析計（S I M S）：細く絞ったイオンビームにより物質表面を掘削し、物質の表面構成元素を質量分析する方法。全ての元素と同位体が原理的に分析可能。物質中の微小部分の微量元素やその同位体比を分析するのに使われる。

(19) 誘導結合プラズマ質量分析装置（I C P - M S）：霧化された溶液試料を Ar ガスと共に高周波磁界による誘導電流でプラズマ状態にし（高周波誘導結合プラズマ（ICP;induction coupled plasma）），生成したイオンを質量分析する装置。イオン化温度が高いため、試料中の元素の 90% がイオン化され、検出もイオン 1 個の単位で行うため、非常に高い検出感度 (ppb-ppt) が得られる。質量分析部には四重極質量分析計を使用しているので、多元素を高速に分析できる。

(20) S H R I M P：オーストラリア国立大学で開発された二次イオン質量分析計の名称。特に、鉛同位体の分析に重点を置き製作されている。世界最古の岩石や鉱物はこの分析装置により発見された。

(21) CVD法：(Chemical Vapor Deposition)の略、化学蒸着法。加熱された基板上有機金属、炭化水素化合物などの熱分解・水素還元気体などを化学反応させて、金属をはじめ、酸化物、炭化物などの無機物質を付着させる方法。特徴としては、高融点物質を低温で合成し蒸着出来ることや、析出物の種類が多様で準安定相化合物の合成も可能なことがある。

(22) 硅酸塩スピネル： $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$ 組成を持つスピネル構造の高圧相。A.E.Ringwood(1958)により、 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 組成について 400 °C、5-6GPa で初めて合成された。地球の上部マントルで、かんらん石が深部にいくにつれて変形スピネル構造をへて、500km を越えるあたりでこの物質に変わると考えられている。

(23) 硅酸塩ペロブスカイト： $(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3$  または  $\text{CaSiO}_3$  組成を持つペロブスカイト構造の高圧相。一部 Al も入りうる。L.G.Liu(1975)により、 $\text{MgSiO}_3$  組成について 30GPa、1000 °C で初めて合成された。地球の下部マントルの主要構成物で地球内部で最も大量にある物質と考えられている。

(24) マグマオーシャン：最近の地球形成モデルによると初期地球は高温で表層部が融解していたと考えられる。この融解部分をマグマオーシャンと呼ぶ。その深さの推定はモデルによって異なり 200 km から 1000 km 以上である。「マグマオーシャン」の言葉は初期の月の融解について始めて提案された。

(25) コマチアイトマグマ：主に始生代にみられる超苦鉄質（MgO に非常に富んだ）の熔岩。南アフリカのバーバートン山地のコマチ層で最初に記載された。

(26) MAX80, MAX90：物質構造科学研究所（旧高エネルギー物理学研究所の放射光実験施設）に設置されているキューピックアンビル高圧装置。高温高圧 X 線その場観察実験に用いられている。わが国独自に開発実用化に成功し世界をリードしている高圧装置。

(27) ユゴニオ（Hugoniot）：衝撃波を受けた状態を記述する状態方程式。

(28) W M I N 法：現実のあるいは仮想の結晶構造から、構造及びエネルギーのパラメーターの最適化を

行う方法。

(29) MD法：多数の原子・分子からなる系について、全粒子の運動方程式を解くことによりマクロ物性を求める方法。

(30) Ab initio 法：経験的パラメーターを使わずに、量子力学的に構造や物性を求める方法。

(31) 全率固溶体：固溶体とは、結晶であるが溶液のように元素組成を変化させる事ができるもので、複数の端成分間のどの組成でもとりうる場合をさす。

(32) 積層欠陥：結晶の格子欠陥の一種で、面状欠陥である。この面状欠陥を挟む両側の結晶領域は、その結晶の並進対称性ではなく、それ以外のベクトルで結ばれている。

(33) ランダウの理論：構造相変態に関する理論である。過剰自由エネルギーを秩序パラメーターによるランダウ展開をして、群論などに基づいて相変態を取り扱うもの。

(34) ランダウ展開：構造相変態を起こす場合に、低温型の安定領域内のある温度・圧力下での高温型と低温型の自由エネルギー差を、秩序パラメーターの多項式で展開すること。

(35) 顕微スペクトロスコピー：物質に照射するビームを絞り、微小領域からのスペクトルを得る方法である。ビームを走査して、特定のスペクトルの分布を画像として得ることもできる。

(36) X線CT法：X線による断層写真。これによって、岩石中の破断面や粒径などの三次元組織を非破壊で明らかにすることができる。

(37) キンバーライト：アルカリに富む超苦鉄質の噴出岩で、ダイアモンドやかんらん岩の捕獲物を含む。南アフリカ、ケニア、タンザニア、シベリアなどに産出。パイプ状をなし、浅い部分では角礫状となる。

(38) 硅酸塩包有物：鉱物はしばしばその中に他の鉱物を含むことがある。含まれている鉱物が硅酸塩鉱物のとき、これを硅酸塩包有物という。

(39) マントル遷移層：地球内部の深さ410kmから670kmの地震波速度の不連続の間の領域。主としてカンラン石の高圧相である変形スピネル相(Wadsleyite)及びスピネル相(Ringwoodite)からなる。

(40) マグネシオブサイト： $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$ 組成を持つ $\text{NaCl}$ 構造の相。地球の上部マントル下部にある $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ 組成の硅酸塩スピネルは、下部マントルでは $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ ペロブスカイトと $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$ マグネシオブサイトに分解すると考えられている。

(41) スラブ：マントル中に深く沈み込んだ海洋プレートの部分で、周囲のマントルよりも低温。このため地震波の速度異常や低減衰の現象が見られる。

(42) ウェッジマントル：沈み込みプレートと島弧側のプレートに挟まれた楔状のマントルで、島弧マグマの発生の場と考えられている。

(43) 地震波のトモグラフィ：地球内部を多くのブロックに分けそこを通る多くの地震波線を解析することにより、地震波の標準モデルからの速度異常の三次元分布をもとめる方法。

(44) 地震波速度の低速度層(LVZ)：マントルの深さ約200km付近に存在する地震波速度の遅い部分。この部分が融点に近いかわざかに溶融しているために地震波速度が減少していると解釈されている。

(45) 地震波速度の高吸収帯 (LQZ) : 地震波の減衰 ( $Q^{-1}$ ) の大きな部分。LVZとほぼ一致し、この部分が高温で融点に近いか、もしくはわずかに融解していることによると考えられている。

(46) コールドブルーム: 沈み込み帯においてマントルに沈み込んでいる海洋の地殻とマントルの一部。地震波トモグラフィの解析によって地震波の高速度域としてマントル遷移層中や下部マントル上部に見い出されている。低温の部分が核マントル境界に向かって崩落しつつあるものと解釈されている。

(47) ホットブルーム: 核とマントル境界など地球内部から上昇する高温物質を言う。地震波トモグラフィの解析で見い出され、特に大規模なものは南太平洋とアフリカ直下の核マントル境界付近に見い出されている。

(48) ゴンドワナ大陸: 約3億年前-6500万年前(古生代後期-中生代)にかけて南半球に存在していたと考えられている大陸。現在の南アメリカ、アフリカ、オーストラリア、南極の各大陸およびインド半島などを含んでいた。

(49) ジルコン:  $ZrSiO_4$ 組成を持つ正方晶系の鉱物。いろいろな火成岩に副成分鉱物として広く含まれる。ThやUがZrを置換して構造中に入るため、放射年代測定にしばしば使われる。

(50) やまと隕石: 1969年日本の南極調査隊によりやまと山脈付近で発見された隕石群。日米がその収集に努め、わが国は約1000個近くを収集し世界一、二を争う隕石保有国になっている。国立極地研究所に所蔵されている。

(51) プレソーラー粒子: 炭素、窒素、希ガスの大きな同位体比の異常が、隕石中の微細なダイヤモンド、 $SiC$ 、グラファイト中に認められ、 $^{13}C/^{12}C$ 、 $^{15}N/^{14}N$ 、 $Xe$ 同位体比などに異常が認められる。このような同位体比の異常のあるものは太陽系が誕生する以前から存在していた鉱物で、太陽系が形成するときに、破壊されることなく隕石の母天体に紛れ込んだものと考えられる。これは太陽より一世代前の星の元素合成反応、星間分子雲、太陽系の誕生などに関する情報をもっていると考えられる。

(52) SNC隕石: 火星起源であると考えられている分化した石質隕石(エンドライト)である。構成鉱物の違いによってシャーゴッタイト(Shergottite)、ナクーライト(Nakhlite)、シャシナイト(Chassignite)に分類されている。

(53) Spring 8: 1997年から稼働している播磨科学公園都市にある8GeVの高輝度放射光実験施設。つくばの高エネルギー加速器研究機構の3GeVよりも大型である。

(54) メスパウア分光: 固体中で基底状態にある原子核がある特定エネルギーの $\gamma$ 線を照射されると、共鳴吸収して励起状態になる。この共鳴現象はメスパウア効果とよばれ、測定された $\gamma$ 線の吸収スペクトルをメスパウアースペクトルという。鉄、金などの約40種の同位体元素がこの効果を示し、そのスペクトルを測定することによって、その元素の荷電数、配位数、各配位の席での存在比率や内部磁場などが判る。

(55) 電子プローブマイクロアナライザー(EPMA): X線マイクロアナライザー(XMA)ともいう。研磨試料片に細く絞った電子線(Electron Probe)を照射して、そこから発生する試料構成元素に特有の特性X線スペクトル(波長と強度)を測定して、微小部分(数ミクロン)の化学組成の定量分析を行う装置。主成分組成定量に最も信頼性のある分析装置である。

(56) レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計(LAM-ICP-MS): ミクロンオーダーに絞ったレーザーを固体試料の表面に照射し、そこから蒸発・ガス化された試料をArガスと共にICP-MSに導入することで、微小領域の質量分析を行う装置。固体試料中の主成分からppbレベルまでの元素を迅速に分析できる。レーザー源には、一般にNd:YAGレーザー(波長:1064nm)が用いられるが、その波長の光の吸収が少ない無機材料・鉱物試料の分析には、その4倍高調波(波長:266nm)が使用される。4倍高調

波を使用すると、レーザー光は直径5ミクロンまで絞れるが、微量元素の定量には30ミクロン程度に集光させことが多い。

(57) PIXE法：EPMAのイオン線版とも言える分析法で、電子線の代わりにイオン線を試料表面に照射し、そこで発生する励起X線の波長と強度を測定する方法で最小検出限界がppmに及ぶ優れた分析法でイオン線分析法の中で最も一般的である。

(58) RBS法：試料に照射した高エネルギーイオン線と試料中の目的元素の核が弹性衝突した結果生ずる散乱イオン線のエネルギーを測定する分析法で、炭素、窒素、酸素などの軽元素や軽元素中の重元素の深さ方向の定量分析に優れている。

(59) ERDA法：RBS法と同様に入射粒子線と試料中の目的元素核の弹性散乱を利用した分析法である。この方法の場合は、RBS法と異なり、入射粒子により反跳された目的元素核のエネルギーを測定する。この分析法は、水素のような軽元素濃度の深さ方向分布を解析するのに最も適しているとされ、その深さ方向解像度は50nmのオーダーである。

(60) NRA法：ある特定のエネルギーのプロトン線またはより重いイオン線の照射によって生じる試料中の目的元素の核反応に基づいている。この核反応によって励起された核は、 $\gamma$ 線放射などを経て減衰する。NRA法は、この放射線のエネルギーと強度を測定することによって分析を行う。このような核反応は、ある特定のエネルギーを持つ特定のイオン線と試料中の特定同位体元素との間でのみ定量的に生じるので、もしその特定同位体元素がイオン線照射によって試料内部で移動などを起こさない限り、試料中のその同位体の濃度分布について定量分析を行うことができる。核反応を生じさせられるイオン線エネルギー範囲は非常に狭く、したがってこの分析法は軽元素の深さ方向分析に適している。

(61) 加速器質量分析法：タンデム型加速器最上流のイオン源から発生させた一次イオン線を試料に照射して試料構成元素の二次イオンを発生させる。この二次イオン線を加速器で加速して高エネルギーイオン線とし、それをmagnetで質量分離して目的元素の分析を行う方法。一種のSIMSといえるが、加速器内部で分子イオンを完全に分解させるため最小検出限界が $10^{-12}$ から $10^{-15}$ と遙かに優れている。従来は $^{10}\text{B}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ などの長寿命放射元素の分析に利用されていたが、最近では $^{129}\text{I}$ ,  $^{197}\text{Au}$ などの重元素の微量元素分析も可能となりつつある。

(62) マスケリナイト：斜長石組成 ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8-\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) のガラス。衝撃を受けた隕石中に発見され、衝撃により斜長石が溶融せずに直接固相のままガラス化したと考えられている。

(63) D"層：核とマントルの境界部の約200kmは地震波速度に異常が認められている。この部分をD"層と呼んでいる。原因については温度の異常や化学組成の異常などが提案されている。

(64) 深発地震：和達清夫によって始めて発見された沈み込み帯にそって存在する地震群。上部マントルと遷移層の深さにおいて多く見られるが、下部マントルではほとんど存在しない。この深発地震帯を和達-ベニオフ帯とも呼ぶ。

(65) SYNROC：Ringwoodによって提案されたsynthetic rockからの造語。高レベル放射性廃棄物の長期貯蔵を可能とする物質として提案、検討されている。hollandite,  $\text{BaAl}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$ ; zirconolite,  $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$ ; perovskite,  $\text{CaTiO}_3$ の3つの平衡共存可能なチタン酸化物から構成され、通常使用されているボロンシリケートガラスに比較して地下水の侵食に対する耐久性が特徴である。粉末の先駆物質から金属容器とともに20MPa, 1100°C程度の条件でホットプレスして合成される。