

地下深部の水

～地震や火山噴火を起こす黒幕の姿を見てみよう～



8月3日(土) 予定表

- 10:00～10:30 受付:理薬キャンパス合同A棟 (建物番号H-02) 2階204講義室
- 10:30～10:50 開講式(科研費の説明、日程説明、参加者のグループ分け、自己紹介)
- 10:50～11:20 講義①
『岩石や鉱物内部の水と、その地球のダイナミクスに対する役割について』
- 11:20～12:00 水熱加熱昇温(全員)
- 12:00～12:40 大学院生・教員と一緒に昼食
- 12:40～14:20 実習ローテーション①・②
- 14:20～16:00 実習ローテーション③・④
- 16:00～16:30 水熱実験産物の回収
- 16:30～17:00 クッキータイム・時間調整
- 17:00～17:30 講義②『実験結果のまとめと考察』
- 17:30～18:00 修了式(アンケート記入、未来博士号授与)
- 18:00 終了・解散

地球内部の水の役割

- 岩石の融点を下げ、マグマを発生しやすくする
 → 沈み込み帯で火山が形成される原因
- マグマを“サラサラ”に動きやすくする・発泡させる
 → 火山の噴火・爆発の原因となる
- 断層の摩擦を下げる
 → 地震を発生しやすくする
- 鉱物の中に入り込んで、柔らかくする
 → マントル対流など地球の大きな動きを促進する
- 固体に比べて圧倒的に速く物質と熱を運搬する
 → 変成作用・鉱床形成
 地球の化学進化

3

水の三態と臨界点

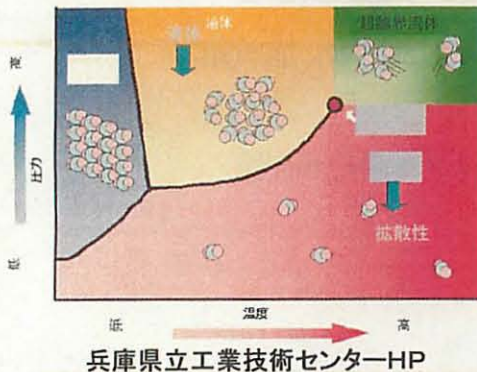


Figure 17.6 Phase diagram for H_2O at relatively low pressures. The solid-liquid boundary is very steep, but in fact has a negative slope.

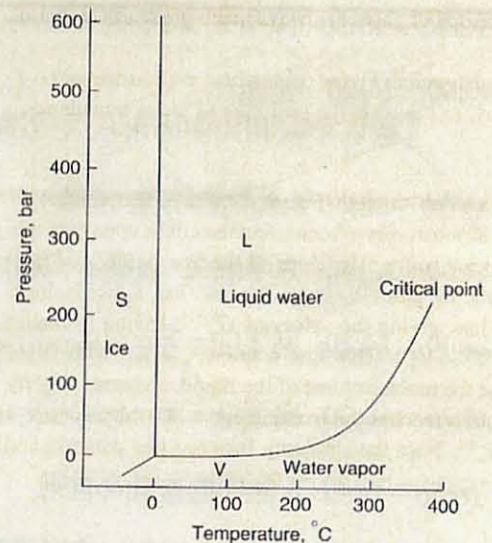
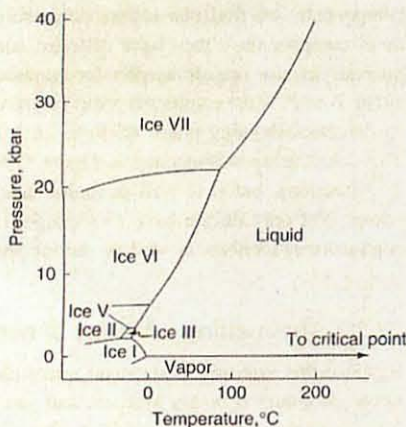


Figure 17.7 Phase diagram for H_2O at high pressures. Ice IV, not shown, is a metastable form of ice in the region of Ice V.



“超臨界流体は、液体の高い分子密度と
 気体の大きい分子運動エネルギーを兼ね備える”

Anderson (2005)
 Thermodynamics of Natural system, Cambridge

沈み込み帯の中～深部地震

沈み込んだプレート:

周囲のマントルより冷たく、応力も大きい

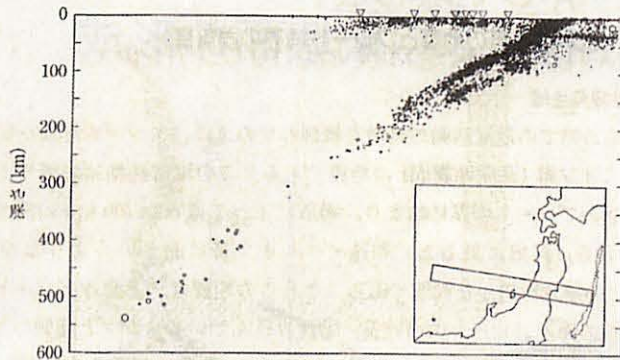
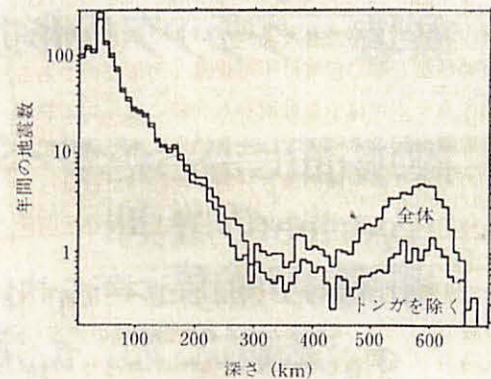


図1.1.5 東北日本を横断する面での微小地震の分布(東北大学私信). 二重地震面が顕著に見られる.



5

地球深部での地震の不思議

- 地震の多くは地球の浅い部分で発生する(低温で岩石が硬い)
 - ・大きな弾性歪エネルギーが蓄積される(壊れたり変形しない)
 - ・クラックの形成による体積増加が容易(割れ目は膨らむ)
- ⇔地球深部は高温高压
 - ・やわらかくて弾性エネルギーが蓄積されにくい(塑性流動が支配的=流れてしまう)
 - ・クラックの形成による体積増加が困難(膨らめない)
 - ・法線応力が封圧に比例して増大(割れ目を押し付ける力が強い)

例) 封圧力 × 摩擦係数 (0.6)

深さ30km(1GPa)なら0.6GPa

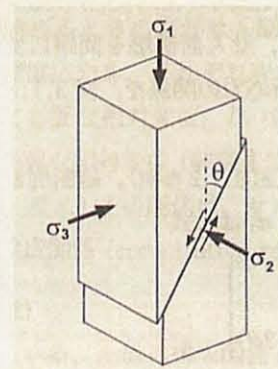
⇔地球内部に働く差応力 < ~0.1GPa

∴ 地球深部での地震には特別なしくみが必要

6

地震の発生条件

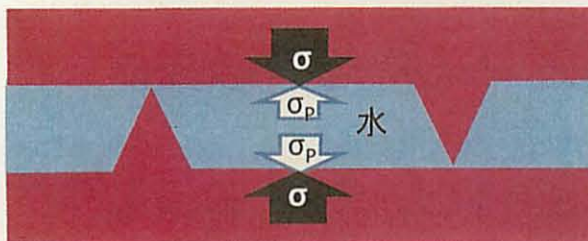
1. 歪エネルギーが蓄積される
2. 歪エネルギーが急激に開放され断層運動
(≒破壊現象)が起こる。詳しく見ると、
 - 破壊＝クラックの形成・伝播による破壊面の形成
 - 破壊面に沿ったすべり
Byerleeの法則
断層の強度 $\tau = \tau_0 + \mu \sigma_n$
 σ_n : 法線応力, τ_0 : 凝集強度,
 μ : 摩擦係数



7

“高間隙水圧による有効法線応力の低下”

岩石の粒子の間や、断層面に存在する圧力の高い水が、固体同士を押し付ける力を弱めて、断層面が滑り易くなる



粒子(鉱物)

$$\tau_0 + \mu \sigma_n = \sigma - \sigma_p$$

粒子(鉱物)

ホバークラフト



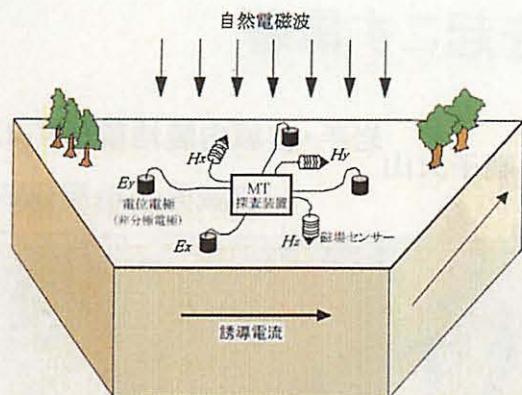
<http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Hovercraft-MVPP10.jpg>

リニアモーターカー



<http://getnews.jp/archives/8793>

8

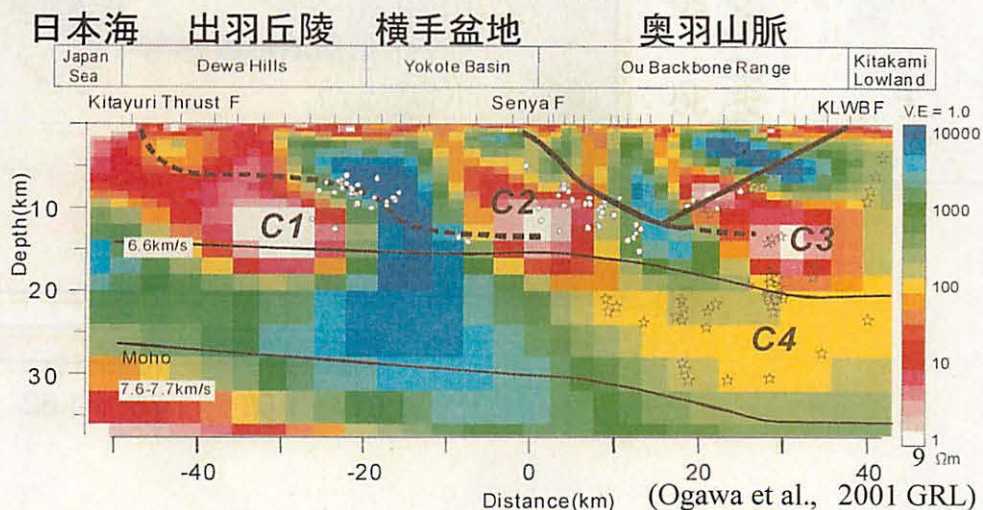


電磁イメージングで見えるようになってきた地下深部の流体

MT (magnetotelluric) 法

自然電磁波が大地に浸透したときに生じる電場と磁場を測定して大地の電気伝導度を測定する。

<http://staff.aist.go.jp/takakura-s/em/em.html>

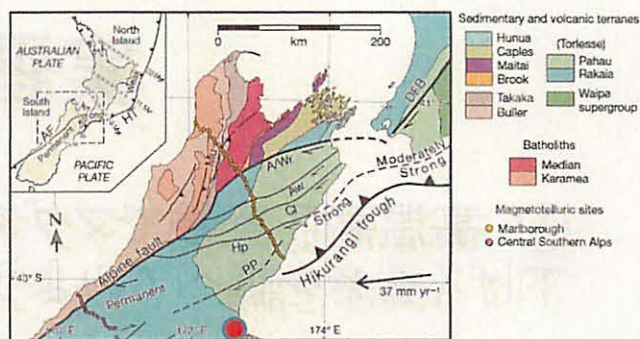


Vol 460, 6 August 2009 doi:10.1038/nature08204

LETTERS

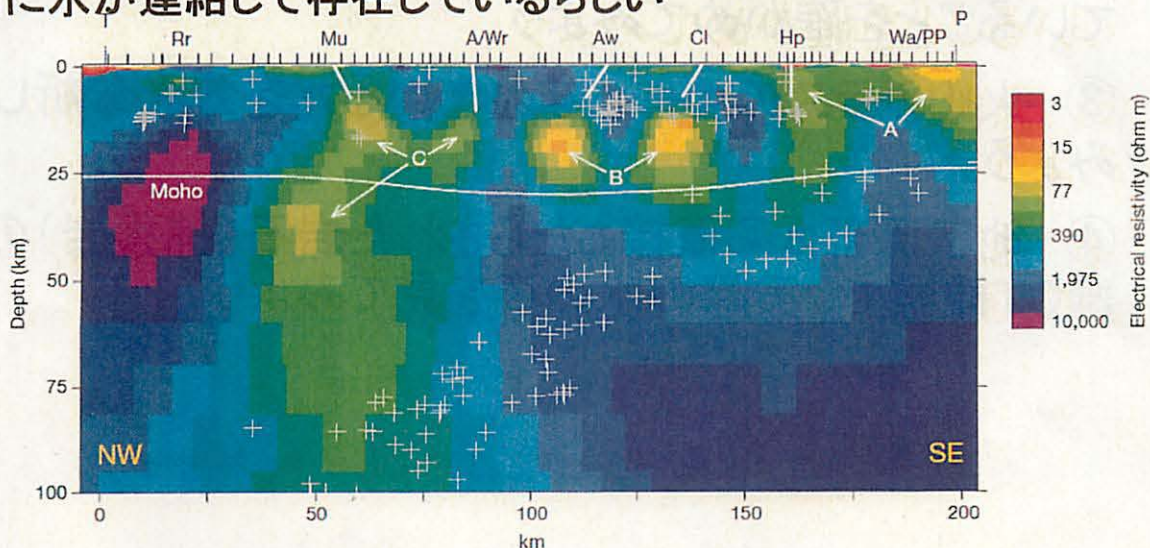
Fluid and deformation regime of an advancing subduction system at Marlborough, New Zealand

Philip E. Wannamaker¹, T. Grant Caldwell², George R. Jiracek³, Virginie Maris⁴, Graham J. Hill¹, Yasuo Ogawa⁵, Hugh M. Bibby², Stewart L. Berris⁶ & Wiebke Heise⁷

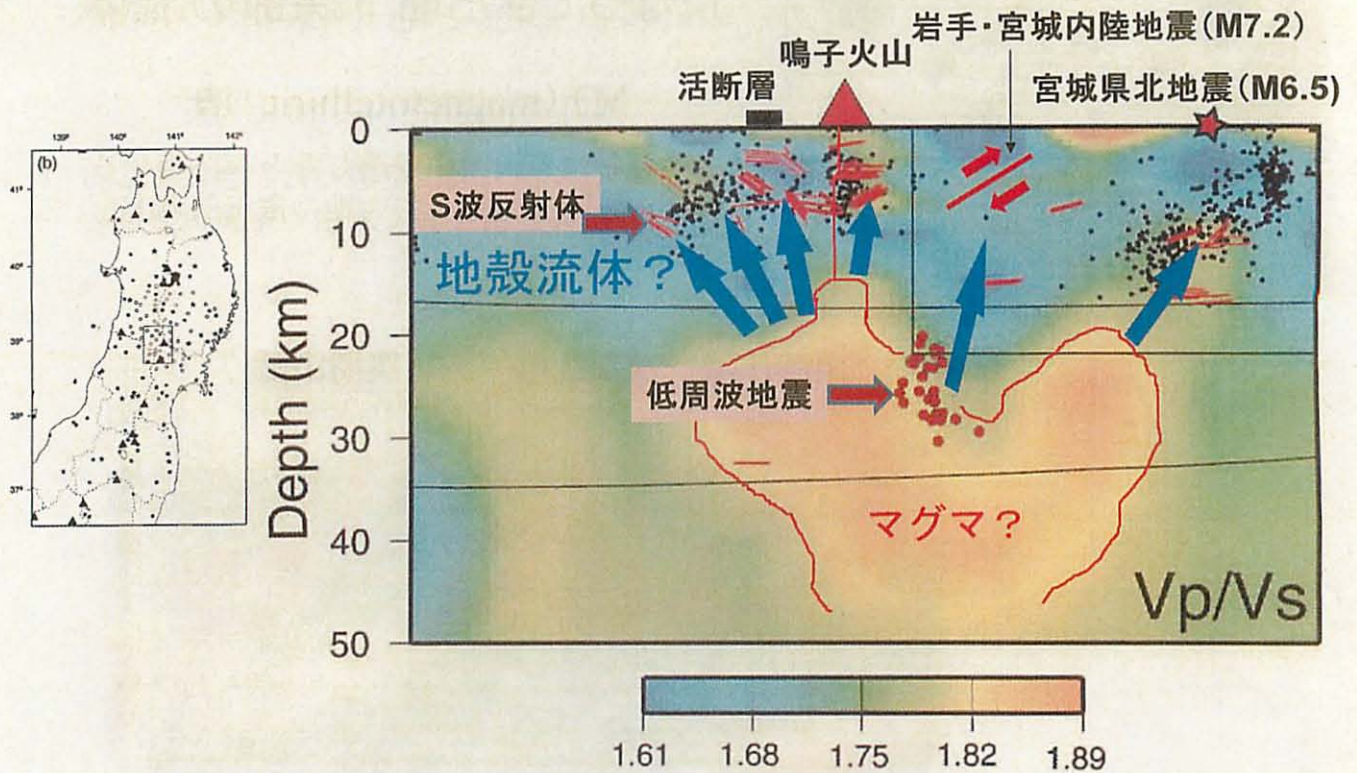


岩石＝電気比抵抗 大きい
粒間に水が連結して存在しているらしい

クライストチャーチ



地殻流体： 内陸地震を起こす黒幕



11

実習内容

- ① 高温高圧実験でマグマを作る：水が岩石の融点を下げる働きを調べてみよう
- ② 含水鉱物(蛇紋石)を加熱分解して、水が含まれていることを確かめてみよう
- ③ 火山ガラスの中に含まれている水を分光分析してみよう
- ④ 地下深部から直接もたらされた岩石(捕獲岩)のX線CT観察で、実際の水の姿を見てみよう

12

ローテーション

11:20-12:00	全体共通 : ①の加圧昇温 A班 B班
12:40-13:30	①マグマを作る ②鉱物加熱分解
13:30-14:20	②鉱物加熱分解 ①マグマを作る
14:20-15:10	③分光分析 ④X線CT
15:10-16:00	④X線CT ③分光分析
16:00-16:30	全体共通 : ①の試料回収

実験室

①405, 903

②904

③401A

④自然史標本館

13

実験①

高温高圧実験でマグマを作る: 水が岩石の融点を下げる働きを調べてみよう

14

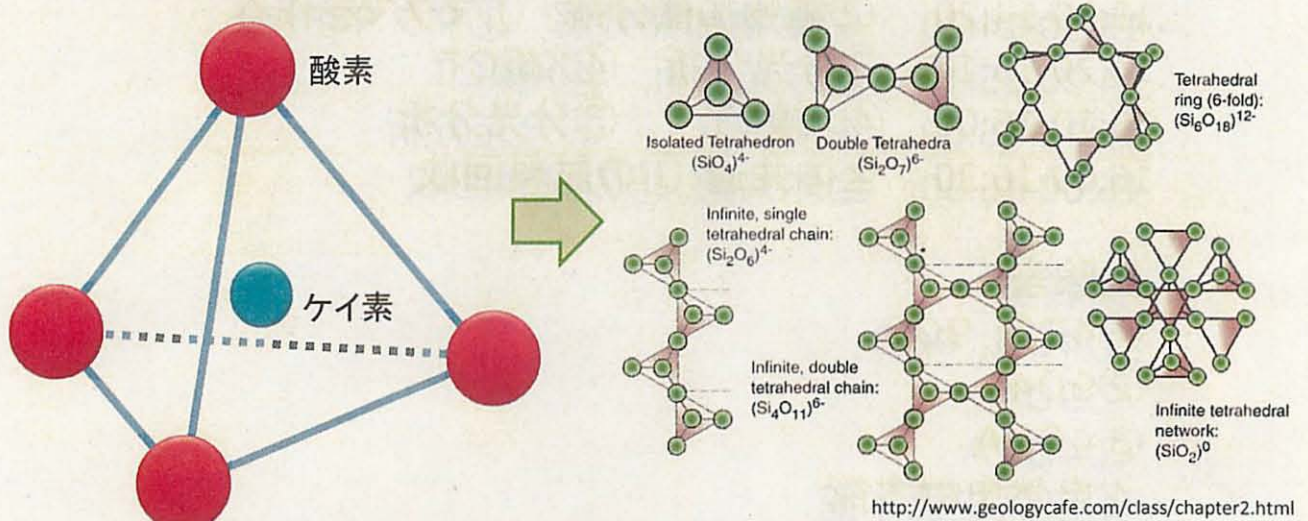
鉱物を構成する主な元素とその構造

➤ 鉱物中に含まれる代表的な元素 : Si(ケイ素)

✓ 地球の表層(岩石圏)に存在する元素で酸素に次いで多い元素

✓ 半導体・セラミックス材料としても用いられる。

→ SiO_4 の四面体が基本骨格となり結晶構造を作り出す

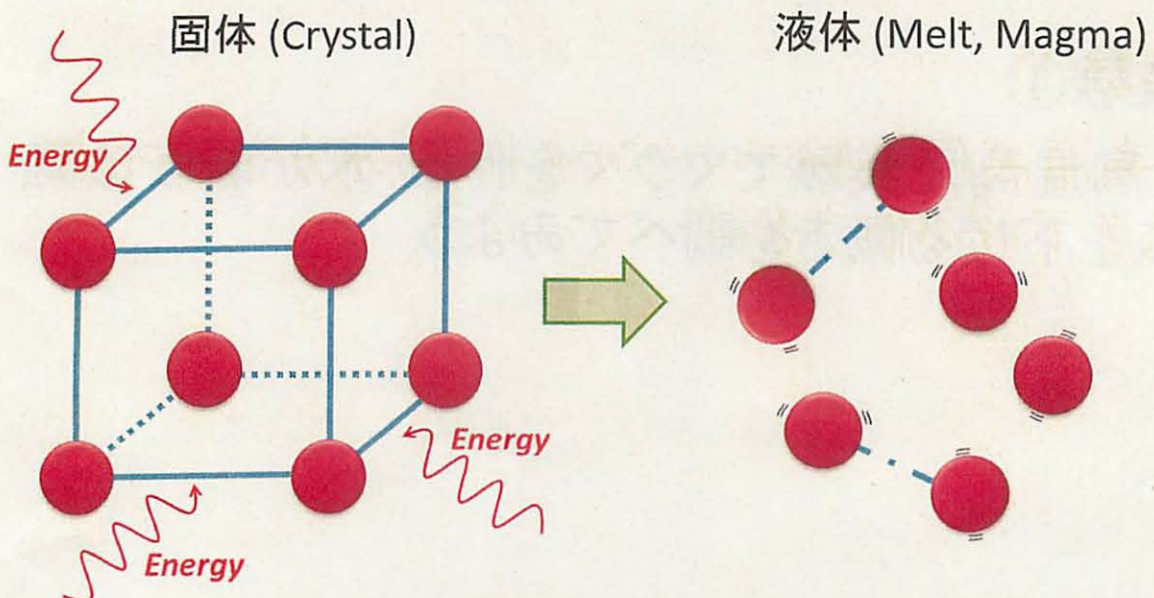


SiO_4 四面体のつながり具合によってさまざまな鉱物ができる

15

融解現象 (Melting)

固体 → 液体



固体にエネルギー(温度上昇など)を加えると結合が切れ、原子がより自由に動ける状態へと変化する(融解)

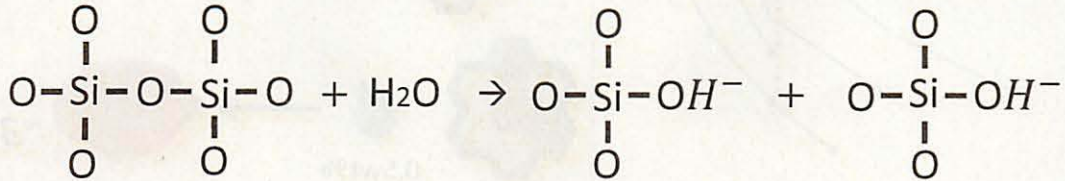
16

融解を促進させる物質

H_2O の効果

➤ 水の効果

結晶構造の結合を切りやすくする → 融けやすくする(融点降下)



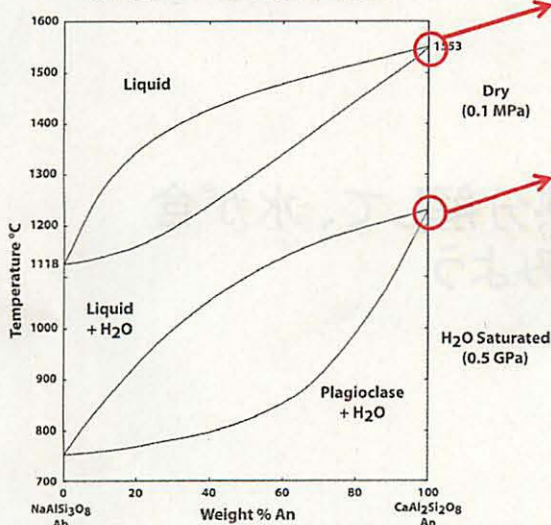
SiO_4 によって作られる結晶構造

地球における“水”の存在は火山現象にも大きく関与しており、マグマ中への水の効果、岩石の融解における水の効果が多くの研究によって調べられてきた。

17

融解を促進させる物質 ～水～ Ex.1

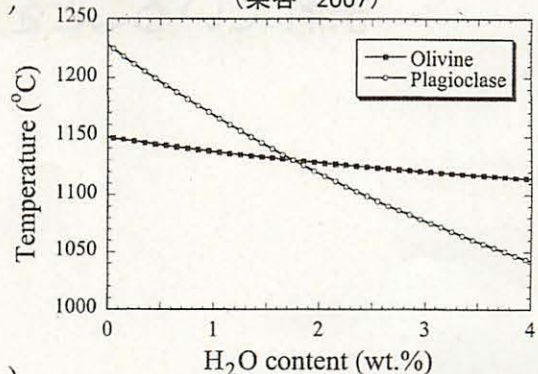
➤ 斜長石の固溶体組成



熔融開始
1553°C

熔融開始
~1250°C

➤ カンラン石と斜長石のリキダス温度 (栗谷 2007)

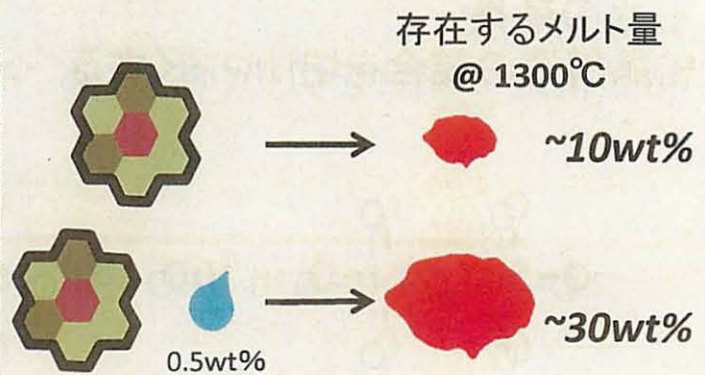
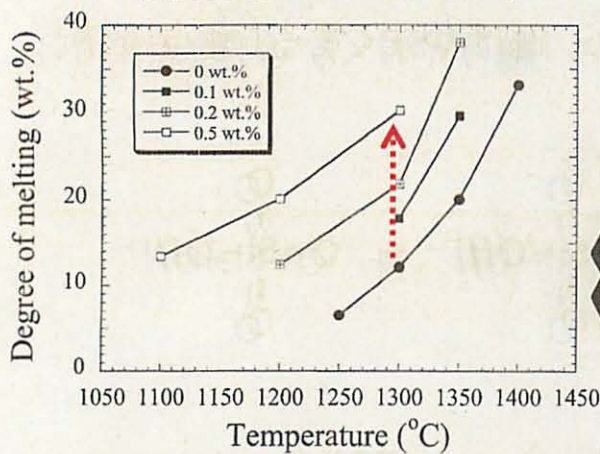


鉱物と水の共存により、鉱物単体で融かすよりも低い温度で鉱物を融かすことができる

18

融解を促進させる物質 ～水～ Ex.2

➤ カンラン岩融解実験での含水量依存性
(Hirose & Kawamoto 1995)



岩石と水を共存させる実験では、同じ温度でも生成されるメルト量が異なる
→ マグマをより効率的に生み出すことが可能

19

実験②

含水鉱物(蛇紋石)を加熱分解して、水が含まれていることを確かめてみよう

20

鉱物中の水とは？

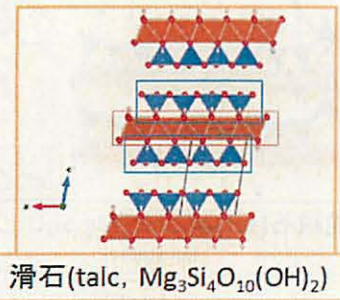
- 結晶構造中にOH基として存在(いわゆるH₂Oの状態ではない)
- 結晶構造中に”水”を含む鉱物を含水鉱物という(身近な例:粘土)

含水鉱物=“層状”ケイ酸塩(“sheet” silicate)

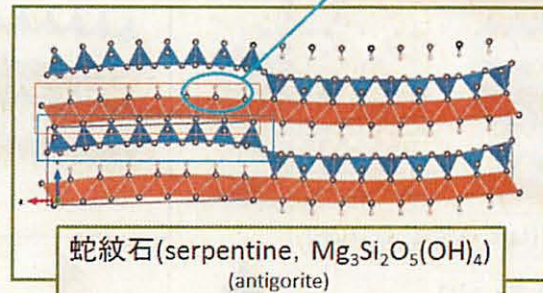
- ・金属原子を中心とする多面体からなる層が積み重なって出来る
- ・鉱物によって積み重なり方が違う
- ・層の長さが異なる場合、湾曲して歪みを解消する

SiO₄四面体

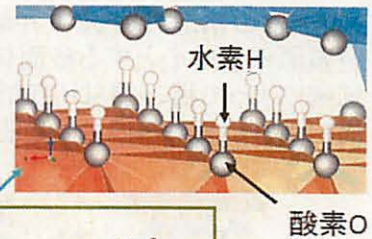
Mg-O八面体



四面体層: 八面体層= 2:1



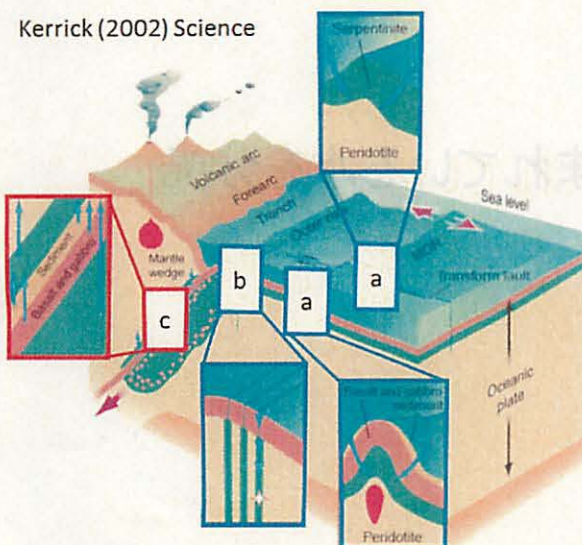
1:1



21

地球内部への水の運搬

Kerrick (2002) Science



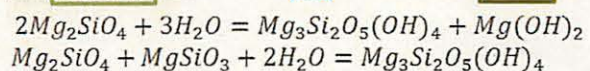
蛇紋岩化が起こる場所

(1)海底熱水と海洋プレートの反応

- a, 海嶺下のマントル上面
- b, アウターライズの断層沿い

(2)スラブ由来の水とウェッジマントルの反応

c, ウェッジマントル底部



含水鉱物としてプレートに”水”を固定
地球の内部へと運ばれる

MOR(中央海嶺): マントルが上昇し、海洋地殻が形成される場所。
Outer Rise(アウターライズ): プレートの“曲げ”によってできる隆起帯。垂直方向に近い断層が走る。
Mantle Wedge(マントルウェッジ): 沈み込むプレート(スラブ)と大陸地殻に挟まれた楔形の部分。

22

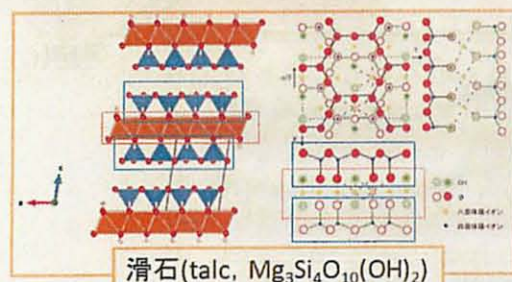
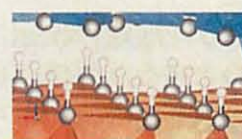
鉱物中の水とは？

-結晶構造中にOH基として存在(いわゆるH₂Oの状態ではない)

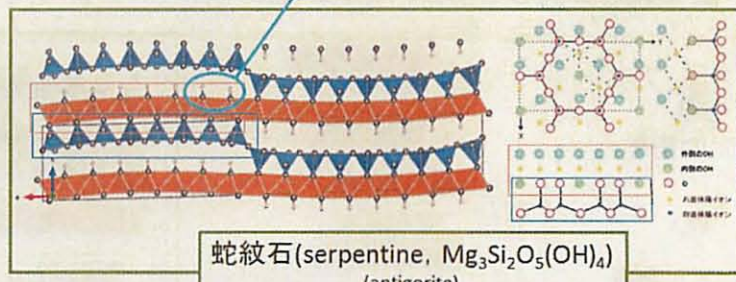
-結晶構造中に”水”を含む鉱物を含水鉱物という(例えば粘土)

含水鉱物の構造=“層状”ケイ酸塩(“sheet” silicate)

- ・金属原子を中心とする多面体からなる層が積み重なって出来る
- ・鉱物によって積み重なり方が違う
- ・層の長さが異なる場合、湾曲して歪みを解消する



四面体層: 八面体層= 2:1



1:1

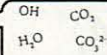
実験③

火山ガラスの中に含まれている水を分光分析してみよう

FT-IR フーリエ変換赤外分光光度計 Fourier Transform InfraRed Spectrometer

FT-IR：化合物分子の赤外吸収スペクトルを利用して、
化合物を定性（何であるか同定する）・定量（その量を測る）する測定法。

赤外分光法をなぜ使うか？－地球科学におけるFT-IR



- 赤外に対して活性がある、水(H₂O)や二酸化炭素(CO₂)の定量や、そのspeciesの同定。
- 例えば鉱物の中にあるメルト包有物を分析すると、マグマ溜まりでの水の量を見積もれる！
- 水や二酸化炭素は「地球内部の水の量、その分布、その形態、地震発生と水」「マグマの発生、火山噴火メカニズム」などと密接に関わってくる。

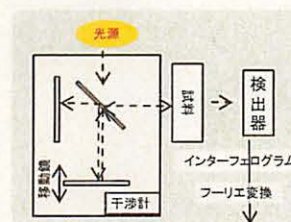
水は泡となって
噴火を駆動する！

「フーリエ変換型」赤外分光光度計の原理

様々な経路で重ねあわされた干渉波を、
計算(フーリエ変換)で分光し、赤外スペクトルを測定。

従来の分散型の赤外分光光度計と比較すると

- ◎測定時間
- ◎強度
- ◎波長範囲

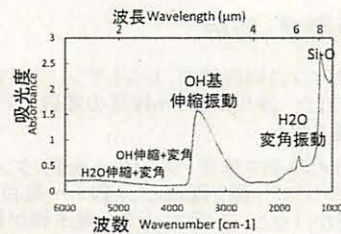


25

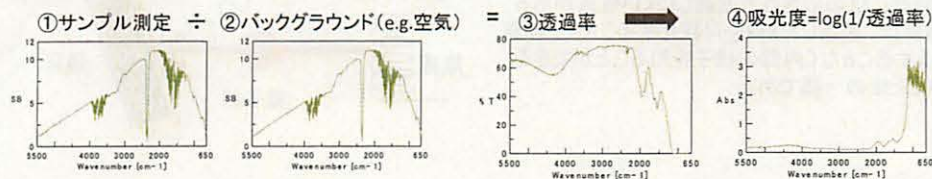
FT-IRで得られるデータ

- 連続赤外線をあてると、振動モードの振動数に対応した特定の波数域の光だけが吸収される。

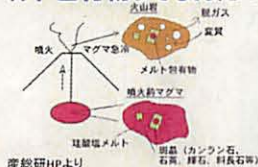
例：玄武岩質安山岩ガラスの赤外スペクトル



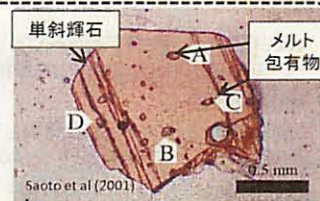
欲しいスペクトル



メルト包有物ってなんだ？



マグマ中で斑晶が晶出する際に、
周囲のメルトを捕獲したもの。
マグマ溜まりの情報を持ってきた
「カプセル」である！



26

実験④

地下深部から直接もたらされた岩石(捕獲岩)のX線CT観察で、実際の水の姿を見てみよう

27

X線CT装置

X線の発見・利用

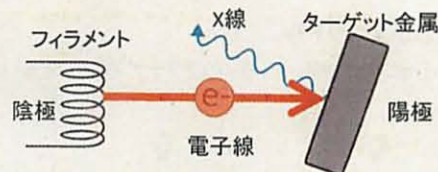
X線はドイツの物理学者、レントゲンにより1895年に発見された。波長が10 nm程度の電磁波で、放射線の一種である。

フィラメント側を陰極、ターゲット金属(タングステン、モリブデンなど)側を陽極とし、数十～数百kVの高電圧をかけると、フィラメントから電子線が飛び出す。電子線がターゲットに衝突すると、X線が放射される。

X線は軽い物質ほどよく透過し、高密度である金属等の物質には吸収されて透過しにくい性質がある。X線撮影は、透過したX線を可視化することで、物質を破壊することなく内部の様子を知ることができる画像検査法の一つである。



ウィルヘルム・レントゲンと、レントゲンが撮影したX線写真
レントゲンはX線発見の功績により、1901年にノーベル物理学賞を受賞



X線CT装置の原理 [X-ray Computed Tomography: コンピュータ断層撮影法]

X線CT装置は、物体に吸収されたX線量を調べ、その値をもとに物体の内部構造を調べる装置である。

物体をある方向からX線照射して得られる透過X線から一つの投影データができる。物体のあらゆる方向からの投影データを入力し、投影データ群から物体の表面・内部構造をコンピュータで計算(再構成)することで、物体を輪切りにしたような二次元の断面画像(CT画像)が得られる。



ScanXmate-D160TSS105/11000 (コムスキャン製)

28

操作手順



[1] X線照射ボックス内で透過X線量の検出

- ① X線発生装置からX線を円錐型に照射.
- ② 回転ステージを360° 回転させながらサンプルに各方向からX線を照射.
- ③ X線検出器で透過X線量を検出.

[2] コンピュータで断層画像に再構成

- ④ 透過X線量をもとにモノクロの投影データを入力.
- ⑤ 投影データ群よりCT画像を再構成.
- ⑥ CT画像群から立体情報を取り出し、3D画像を作成.

29

捕獲岩—地球深部からの物質—

捕獲岩とは

マグマが地表に向かって上昇する時に、その上昇速度がかなり速い場合、周りの岩石をマグマの中に取り込むことがあります(図1)。この取り込まれた岩石を『**捕獲岩**』と言い、比較的速く地下深部から上昇してくるため、**地球深部の情報を保存している**可能性があります。この捕獲岩を研究することで我々は現在の掘削技術では手の届かない地球深部の情報を直接手に入れることができるのです。

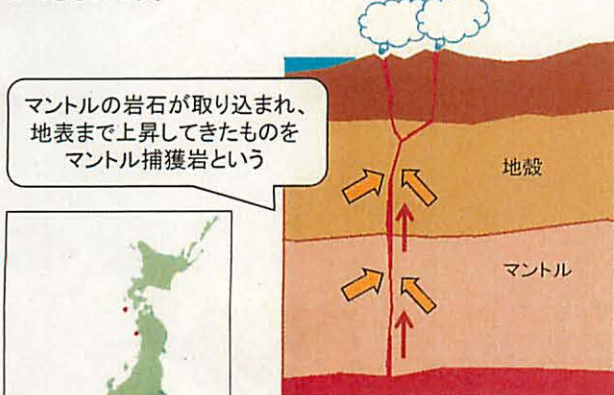


図1: マグマの上昇によって捕獲される岩石

図2: 日本のマンツル捕獲岩の産地

捕獲岩から何がわかるの?

捕獲岩にはかんらん岩や斑レイ岩など様々な種類の岩石があります。図3はかんらん岩で、マンツルに由来する岩石です。オリーブ色の鉱物がかんらん石、アメ色の鉱物が斜方輝石、エメラルドグリーン色の鉱物が単斜輝石です(図4)。少量含まれている黒色の鉱物がスピネルで、捕獲岩の由来する深さによってはスピネルの代わりにガーネット(より高压)、斜長石(より低压)が捕獲岩に含まれます。このように鉱物組み合わせから捕獲岩の由来する深さを定性的に知ることができます。

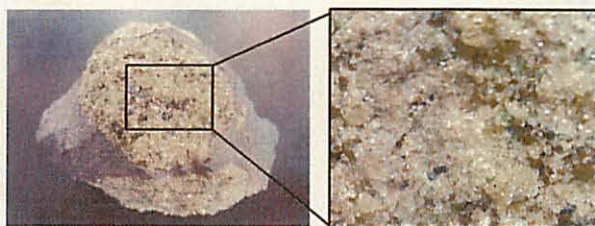


図3: かんらん岩

図4: かんらん岩を構成する鉱物

他にも、地殻やマンツルの構造や捕獲岩をもたらしたマグマ活動はどんなものであったのかなども捕獲岩から明らかにすることができます。

捕獲岩は地球深部からの手紙！

もっと科研費について知りたい方は

○JSPS日本学術振興会科研費ホームページ

<http://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/>

○科研費データベース(国立情報学研究所)

<http://kaken.nii.ac.jp/>

ひらめき☆ときめきサイエンス

○JSPS日本学術振興会 ひらめき☆ときめきサイエンスホームページ

<http://www.jsps.go.jp/hirameki/>



お問い合わせ

独立行政法人日本学術振興会(JSPS)

研究事業部研究助成第二課企画・調整係

TEL 03-3263-1431

HP <http://www.jsps.go.jp/>

詳細はこちらへ

<https://cp11.smp.ne.jp/gakujutu/seminar>

