

ナノビームを用いた極高圧下における惑星科学

船守展正

東京大学大学院理学系研究科

I. はじめに

惑星の内部構造とダイナミクスの解明に向けて
惑星内部の圧力温度条件
ダイヤモンドアンビル装置を用いた超高压発生

II. 高压下その場放射光X線回折実験の紹介

最近の研究から: 100GPa領域までのSiO₂ガラスの構造の変化

III. 高压下その場X線顕微鏡観察実現への期待

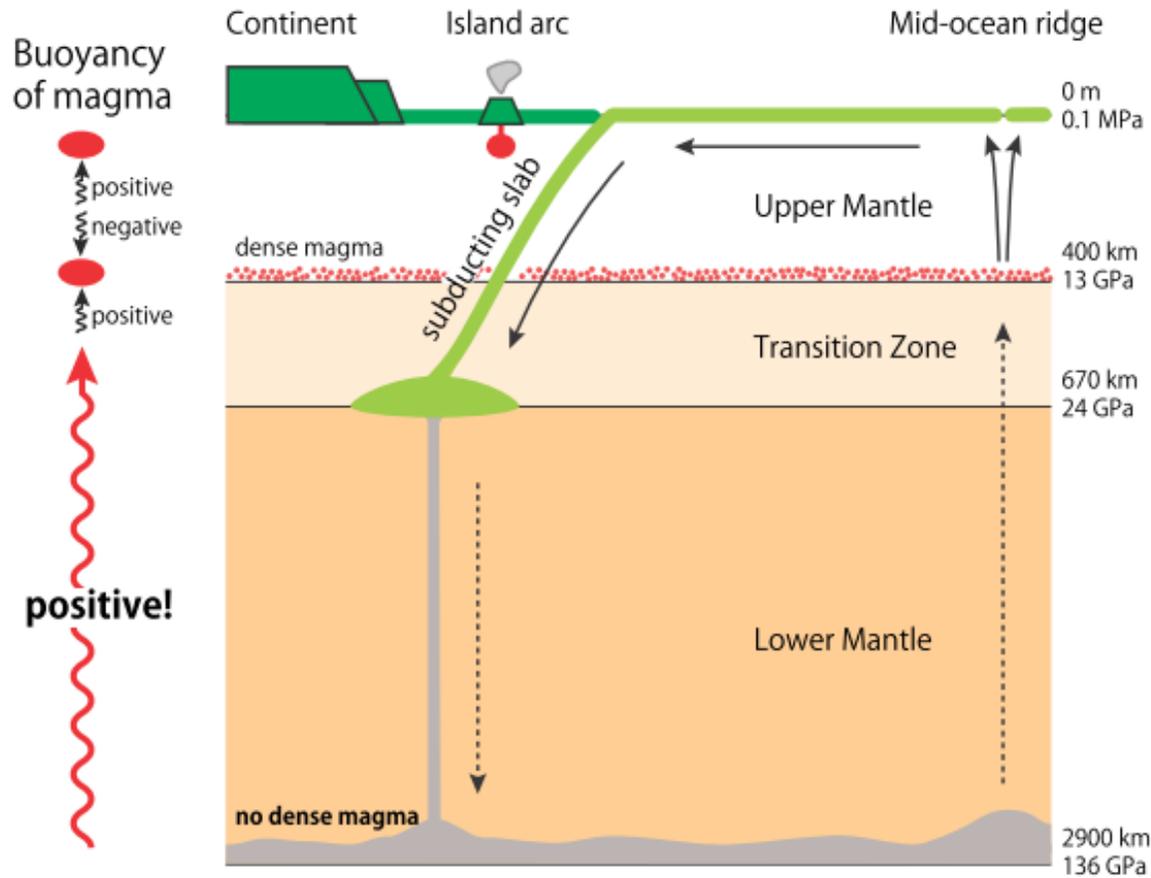
透過型電子顕微鏡観察の成功例
最近の研究から: ヘリウム中でのSiO₂の圧縮挙動

VI. おわりに

PF将来光源利用高压科学ワーキンググループの紹介

I. はじめに

地球マントルにおけるマグマの浮沈



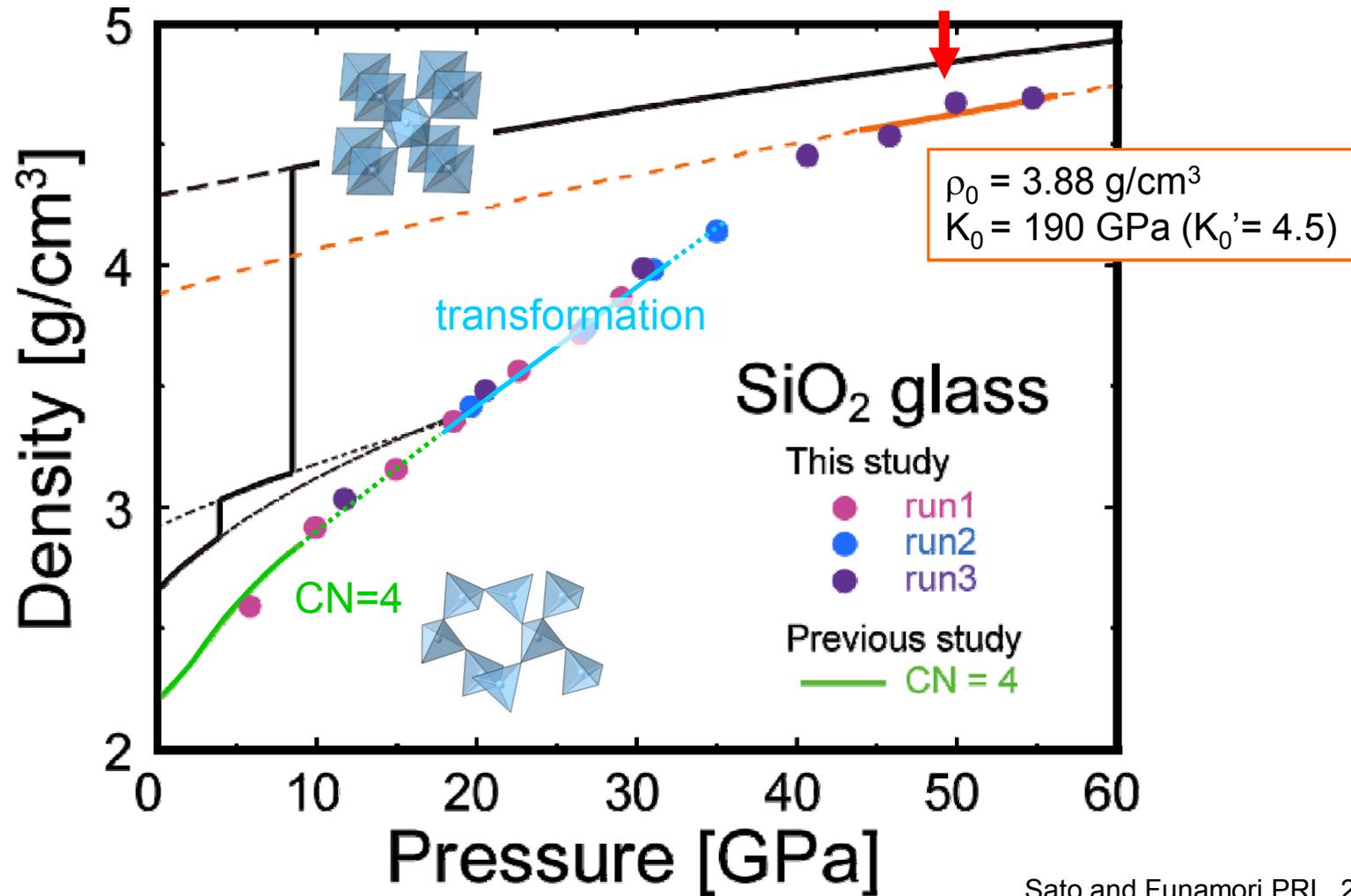
Funamori and Sato, PF NEWS, 2010

惑星内部の構造とダイナミクス： 状態方程式・相転移・化学反応 → 密度

I. はじめに

SiO₂ガラスの密度の圧力変化

6配位のアモルファス相



Sato and Funamori, PRL, 2008

I. はじめに

地球や惑星の温度圧力環境

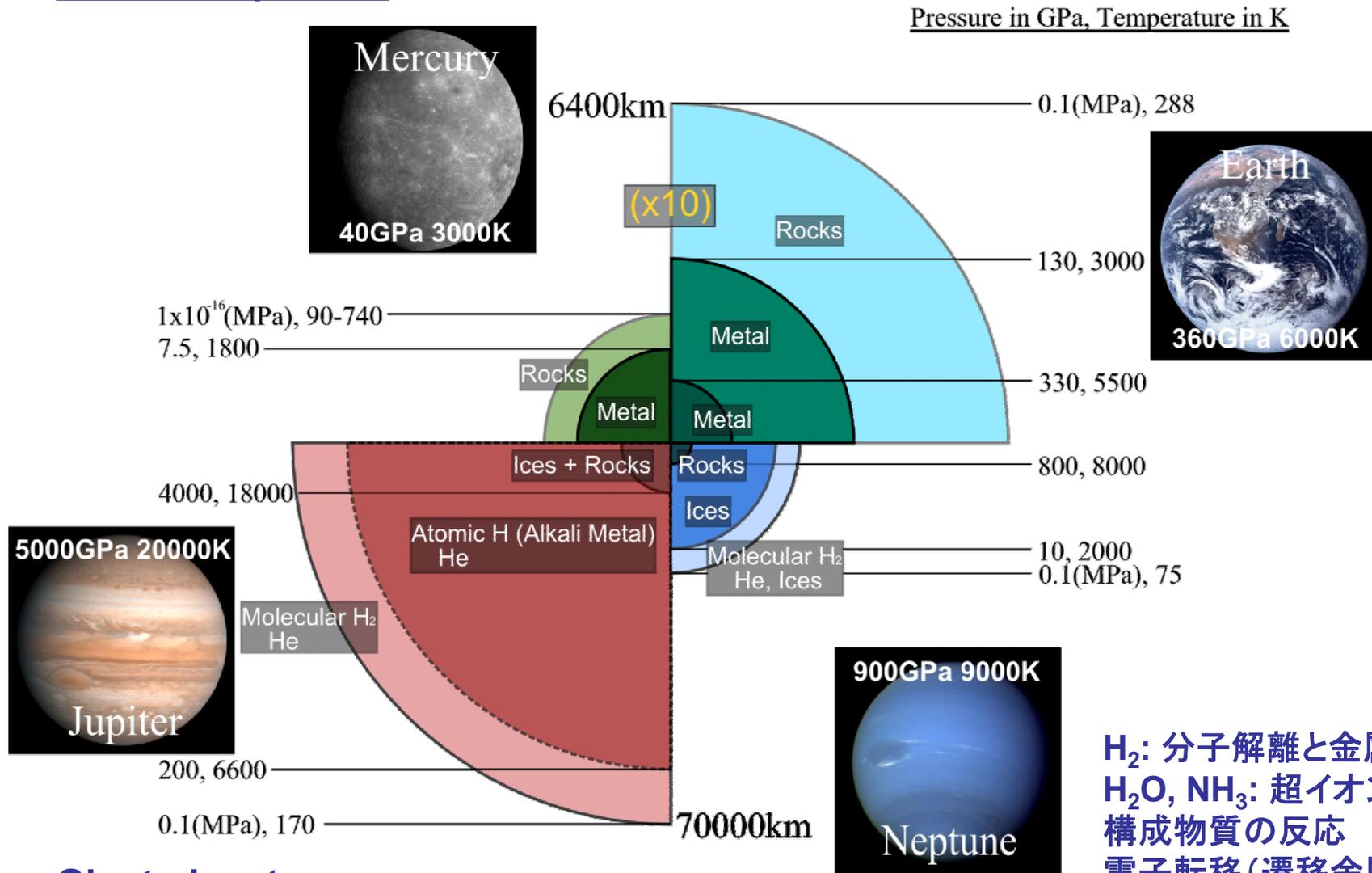
	高度・深度	圧力	温度
エベレスト	8848 m	0.03 MPa	
富士山	3776 m	0.06 MPa	
地球表面	0 m	0.1 MPa	
潜水深度世界記録	-162 m	1.7 MPa	
有人深海探査船「しんかい」	-6500 m	65 MPa	
無人深海探査船「かいこう」	-11000 m	110 MPa	
最高気温 イラク・バスラ (1921)			58.8 °C
最低気温 南極・ボストーク基地 (1983)			-89.2 °C
地球中心	-6400 km	360 GPa	6000 °C
木星中心	-71000 km	5000 GPa	20000 °C

圧力の単位 $1000 \text{ hPa} = 0.1 \text{ MPa} = 0.1 \text{ MN/m}^2$

東大・理・地球惑星科学ホームページ

I. はじめに

Terrestrial planets

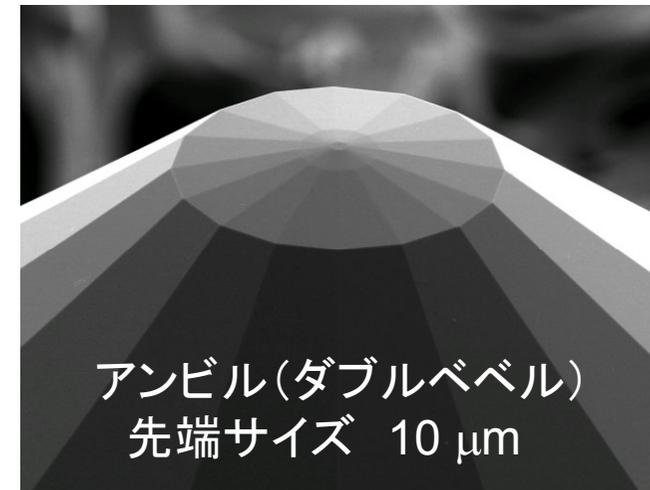
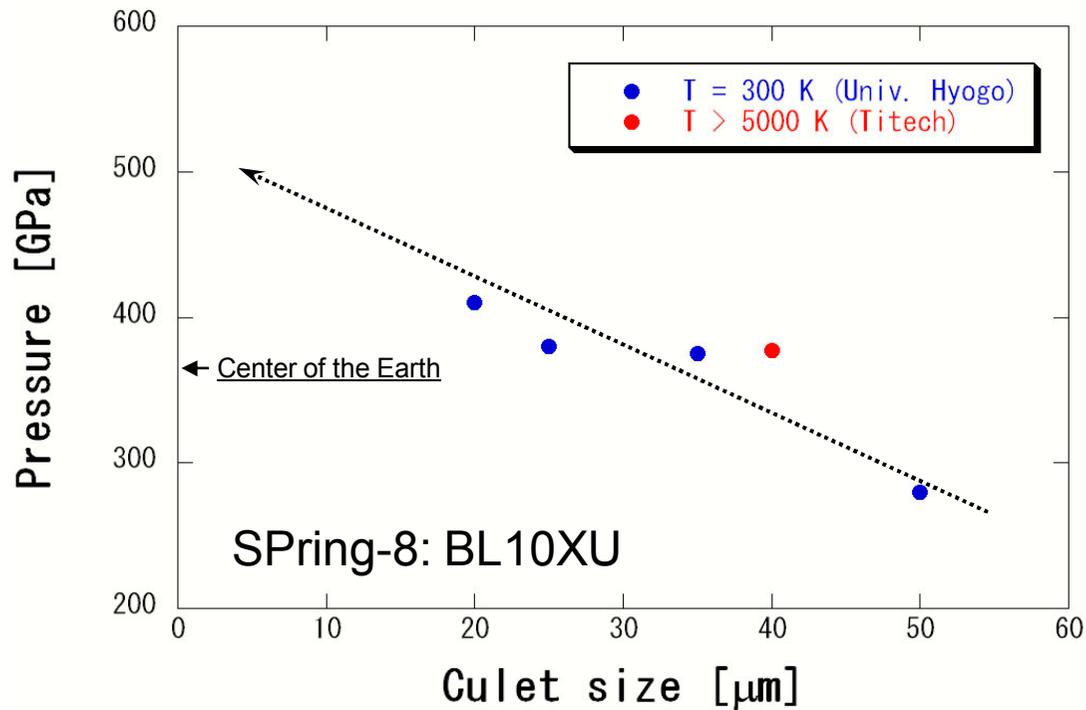


H₂: 分子解離と金属化
 H₂O, NH₃: 超イオン化
 構成物質の反応
 電子転移(遷移金属など)

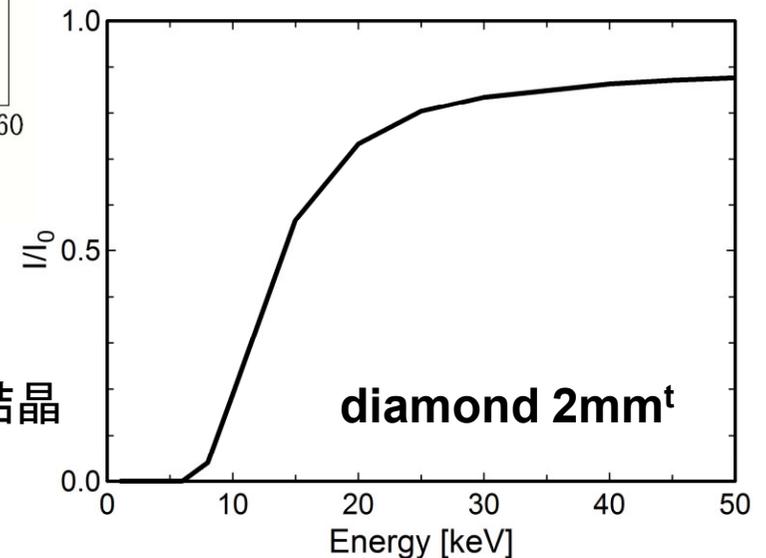
Giant planets

I. はじめに

ダイヤモンドアンビル装置を用いた超高压発生



写真提供 (株)シンテック



地球の中心に相当する圧力温度に到達

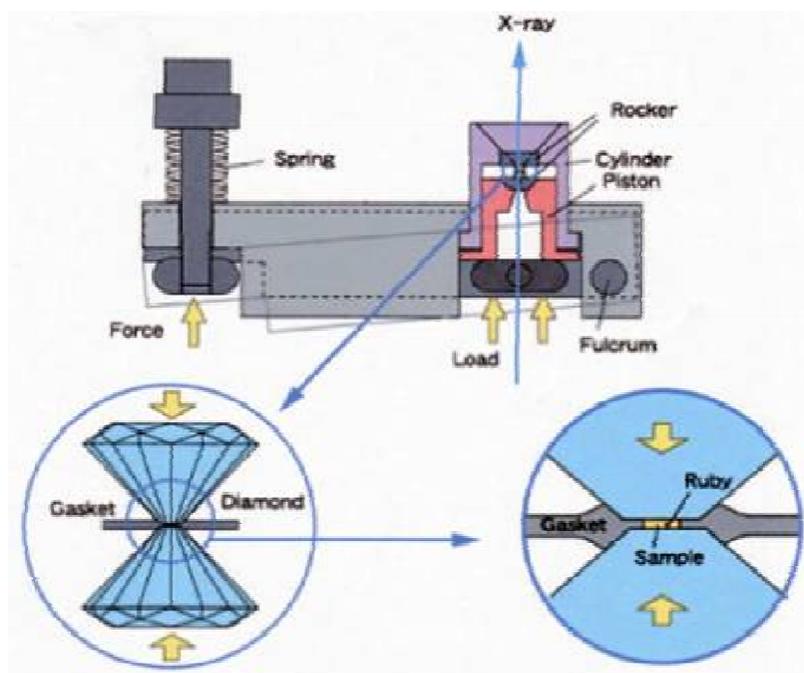
但し、試料はMoやFeなどX線散乱能の高い元素の結晶

500 GPa以上に到達するにはブレークスルーが必要

II. 高圧下その場放射光X線回折実験の紹介

ダイヤモンドアンビル装置 (DAC) と放射光の組み合わせを用いた非晶質を対象とする高圧下その場実験技術の開発

- ・ c-BNガasket (Funamori & Sato, RSI, 2008)
- ・ X線回折法による高圧下その場構造測定 (Sato et al., RSI, 2010)
- ・ X線吸収法による高圧下その場密度測定 (Sato & Funamori, RSI, 2008)

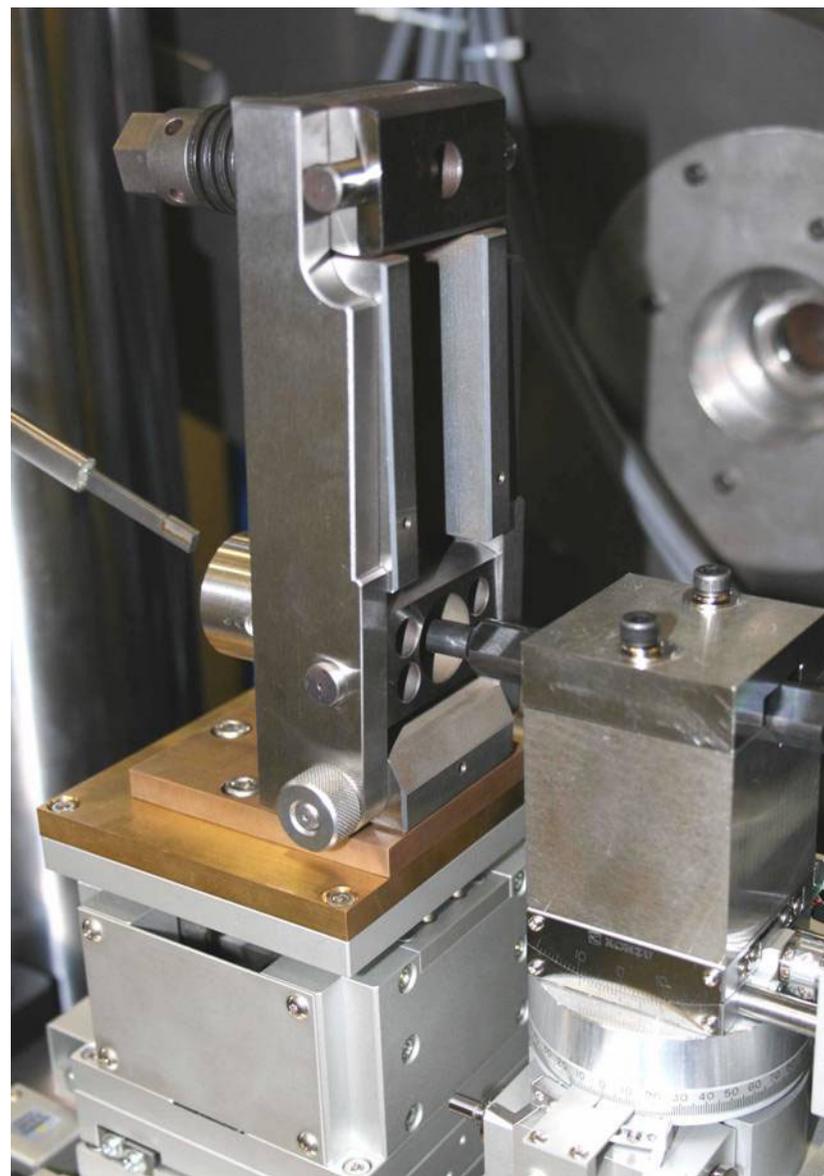
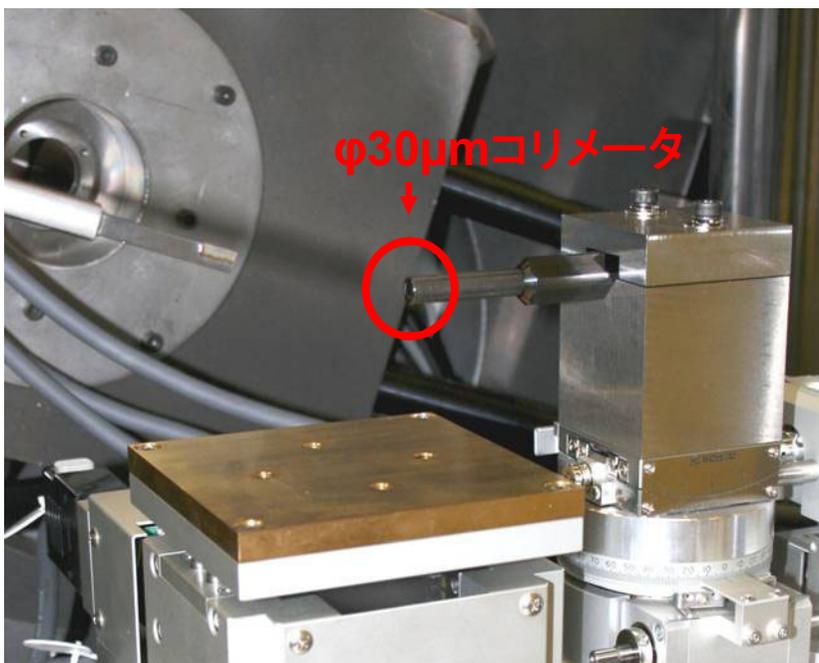


東大・理・地球惑星科学ホームページ

II. 高圧下その場放射光X線回折実験の紹介

実験概要

- 白色X線によるX線回折法
- $E = 20\sim 60\text{keV}$
- PF: BL-14C2
- $\phi 30\mu\text{m}-10\text{mm}^{\dagger}$ WCコリメータ
- スリット系
- 100GPaまでの測定



II. 高圧下その場放射光X線回折実験の紹介

実験概要

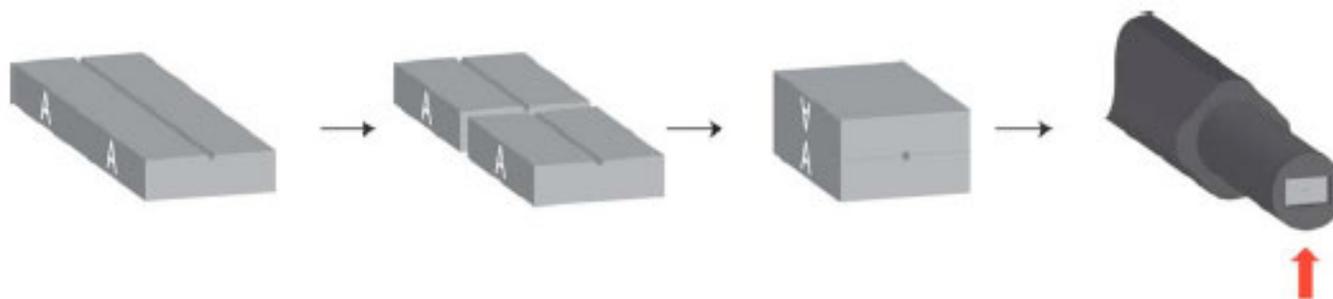
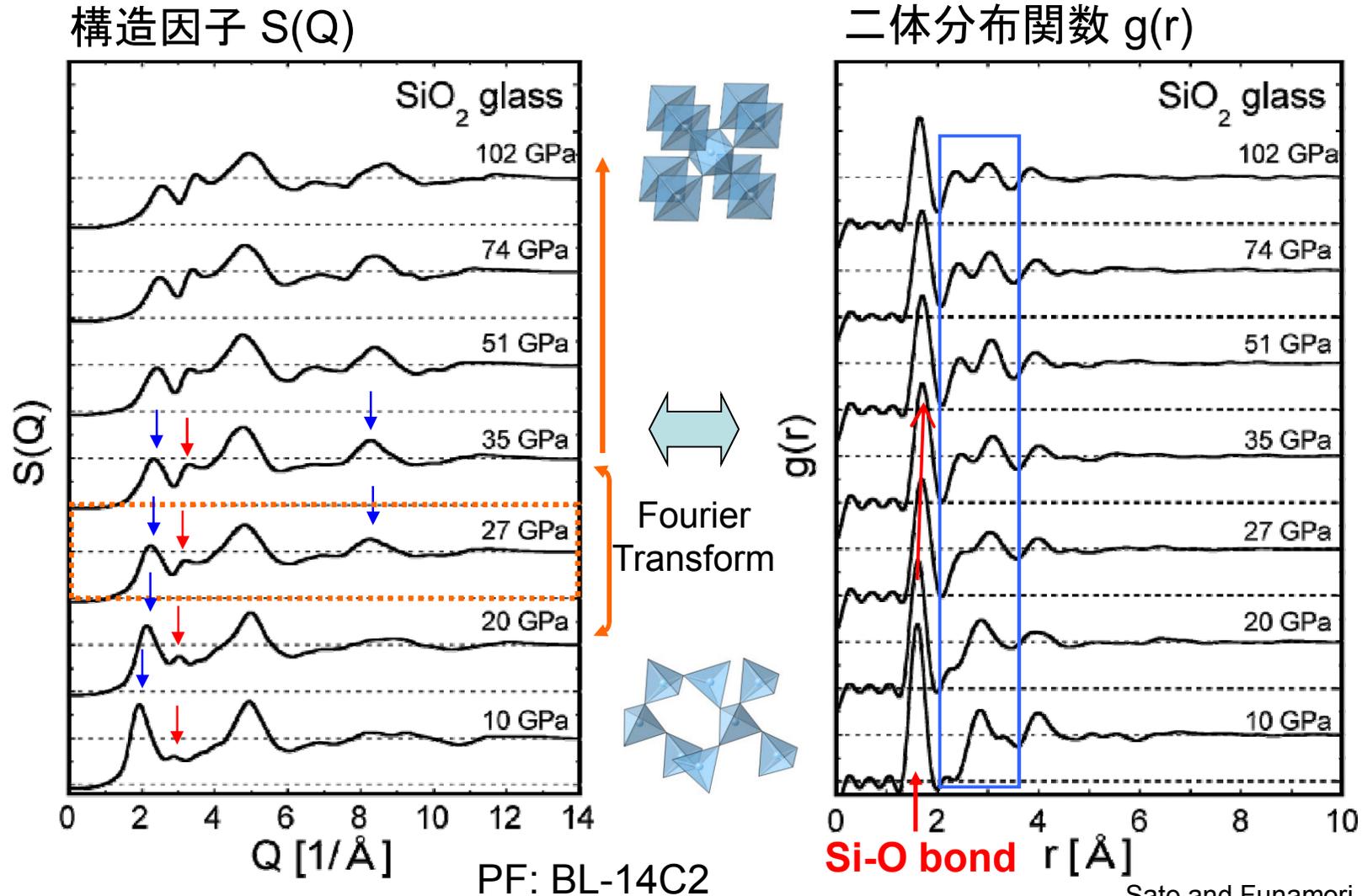


FIG. 1. (Color online) Schematic illustrations of the entrance collimator. A semicircular groove of $30\ \mu\text{m}$ in diameter was carved on a tungsten carbide plate of 20 mm length precisely parallel to the AA plane (reference plane). To make a hole of $30\ \mu\text{m}$ in diameter and 10 mm in thickness, this plate was cut off in the middle, and the half plates were fixed in the holder which was machined to align the reference plane precisely (indicated by the arrow). The hole can be used to reduce the size of the incident x-ray beam.

コリメータの重要性 ⇔ 実験における幾何学的制約

II. 高圧下その場放射光X線回折実験の紹介

SiO₂ガラスのS(Q)とg(r)



Sato and Funamori, PRB, 2010

III. 高圧下その場X線顕微鏡観察実現への期待

ザクロ石 Garnet : $(\text{Mg,Fe,Ca})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

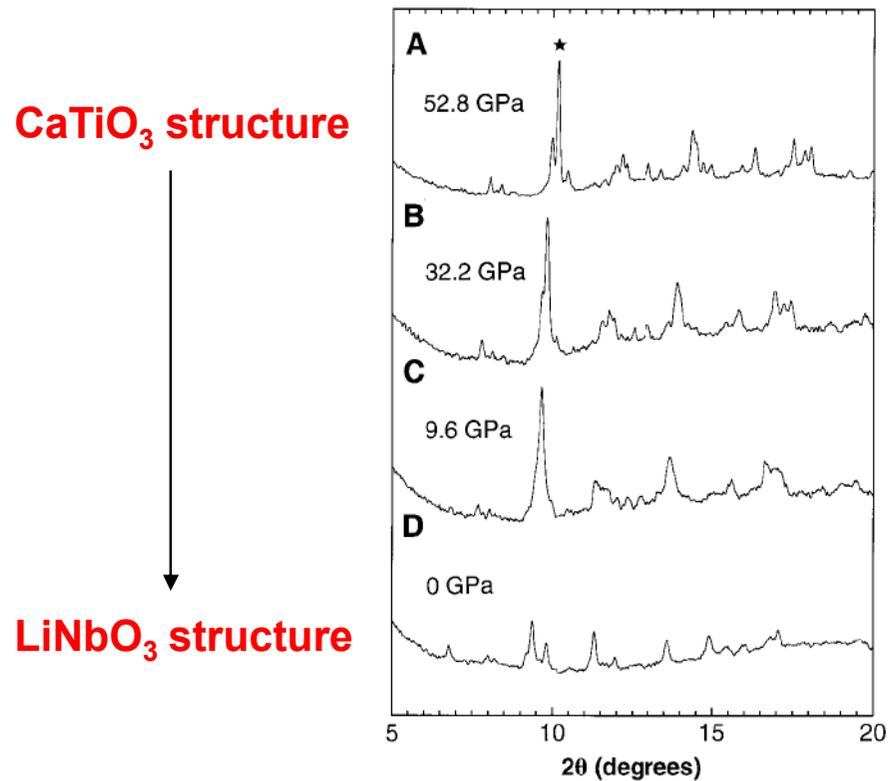


Fig. 1. X-ray diffraction profiles of the ~60 GPa sample obtained during decompression at room temperature. The star indicates the characteristic triplet $020+112+200$ of orthorhombic perovskite.

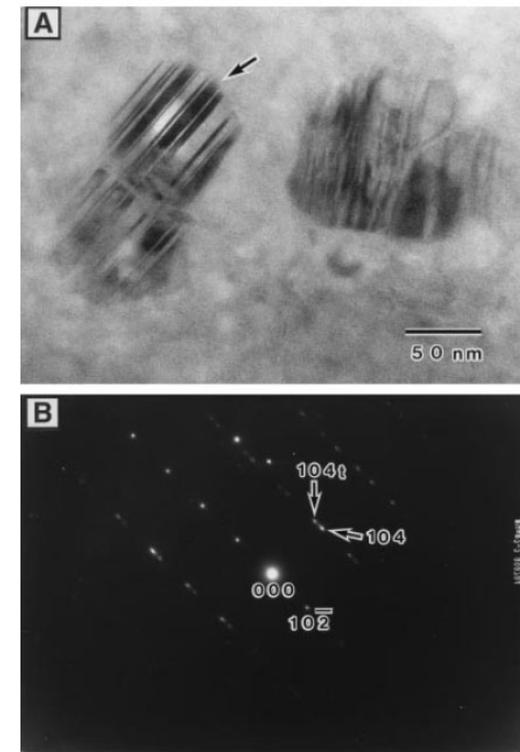


Fig. 2. (A) TEM micrograph of the sample recovered from ~60 GPa. (B) Selected area electron diffraction pattern of the grain indicated by the arrow in (A). The grain shows the polysynthetic twinning on the plane $\{10\bar{1}2\}$.

PF: BL-13B2

Funamori et al., Science, 1997

III. 高圧下その場X線顕微鏡観察実現への期待

尖晶石 Spinel : $MgAl_2O_4$

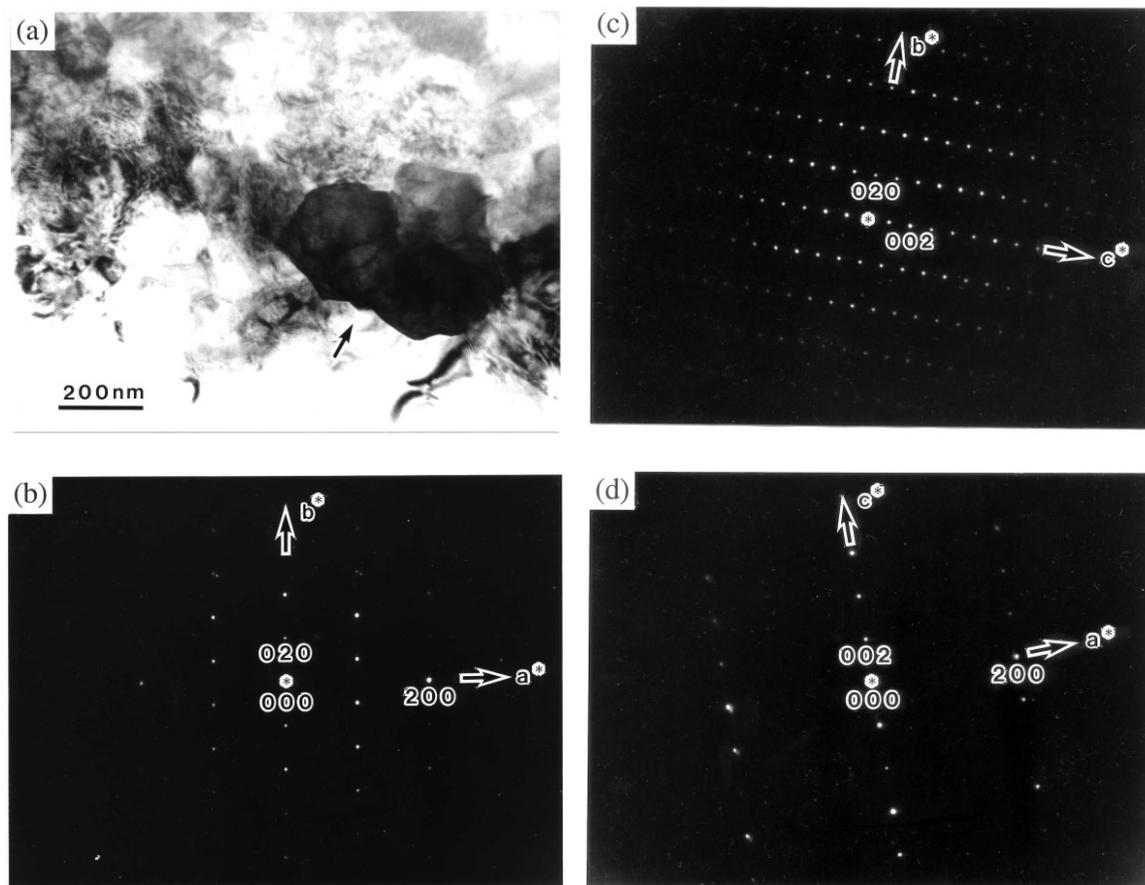


Figure 3. Transmission electron micrograph and selected area electron diffraction (SAED) patterns for $CaTi_2O_4$ -type $MgAl_2O_4$. (a) A bright-field TEM image. The SAED pattern from the grain indicated by the arrow is shown in Figure 3c. (b)-(d) SAED patterns for $hk0$, $0kl$, and $h0l$ reciprocal lattice planes, respectively.

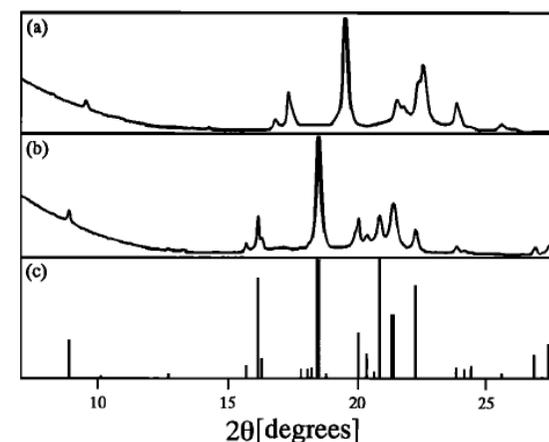


Figure 2. X ray diffraction patterns for $CaTi_2O_4$ -type $MgAl_2O_4$ (run 4) (a) obtained at 64.3 GPa after heating, (b) obtained at ambient conditions after decompression, and (c) calculated for the $CaTi_2O_4$ phase and Pt (thick gray lines) at ambient conditions.

SSRL: 10-2

**$CaTi_2O_4$ structure
(Cmcm)**

Funamori et al., JGR, 1998

III. 高圧下その場X線顕微鏡観察実現への期待

中央海嶺玄武岩 Mid-Ocean-Ridge Basalt

Table 2. ATEM Data of High-Pressure MORB Assemblage

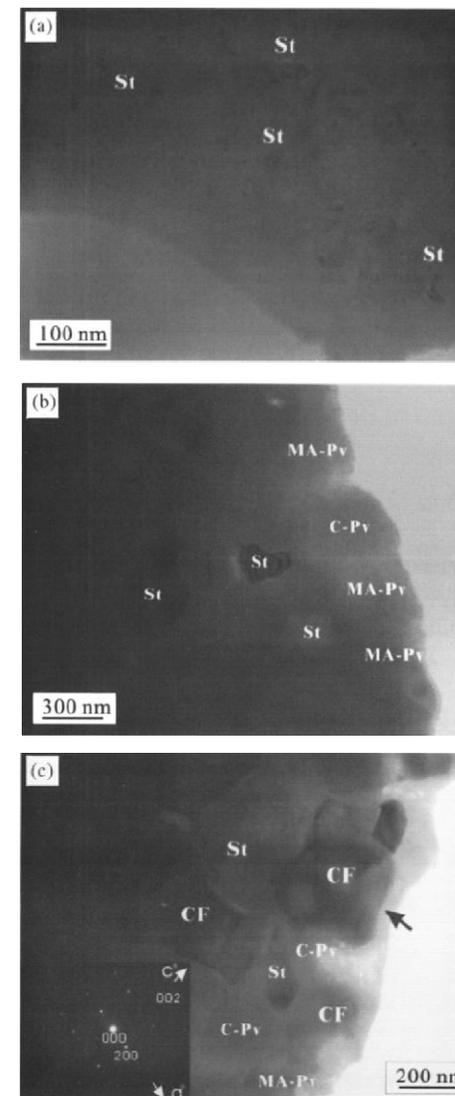
Phase	Cation Number ^a (O=12)							Cation Sum	Proportion, ^b wt %
	Mg	Fe ^c	Ca	Al	Si	Na	Ti		
<i>Low-T Assemblage</i>									
CMA-Pv	1.22	0.52	1.07	1.52	3.33	0.31	0.05	8.02	94
St	0.03	0.00	0.00	0.20	5.83	0.01	0.00	6.08	6
<i>Middle-T Assemblage</i>									
MA-Pv	1.62	0.58	0.49	2.21	2.86	0.38	0.04	8.18	56
C-Pv	0.61	0.41	2.31	0.87	3.61	0.16	0.03	8.00	32
St	0.04	0.01	0.00	0.28	5.76	0.02	0.00	6.11	12
<i>High-T Assemblage^d</i>									
MA-Pv	1.84	0.76	0.17	1.87	3.10	0.19	0.07	8.00	47
C-Pv	0.31	0.37	2.48	0.60	3.84	0.29	0.05	7.94	36
CF	1.19	0.44	0.18	3.43	2.05	1.79	0.02	9.11	10
St	0.04	0.01	0.02	0.18	5.82	0.03	0.00	6.10	7
<i>Bulk Sample</i>									
---	1.07	0.49	0.96	1.52	3.49	0.28	0.04	7.85	---

^aAnalytical uncertainties are ~10% relative for all elements. See Fujino *et al.* [1998] for more detail.

^bProportions of high-pressure phases were calculated by a least squares method on the basis of mass balance requirements.

^cAll Fe was assumed to be in ferrous state.

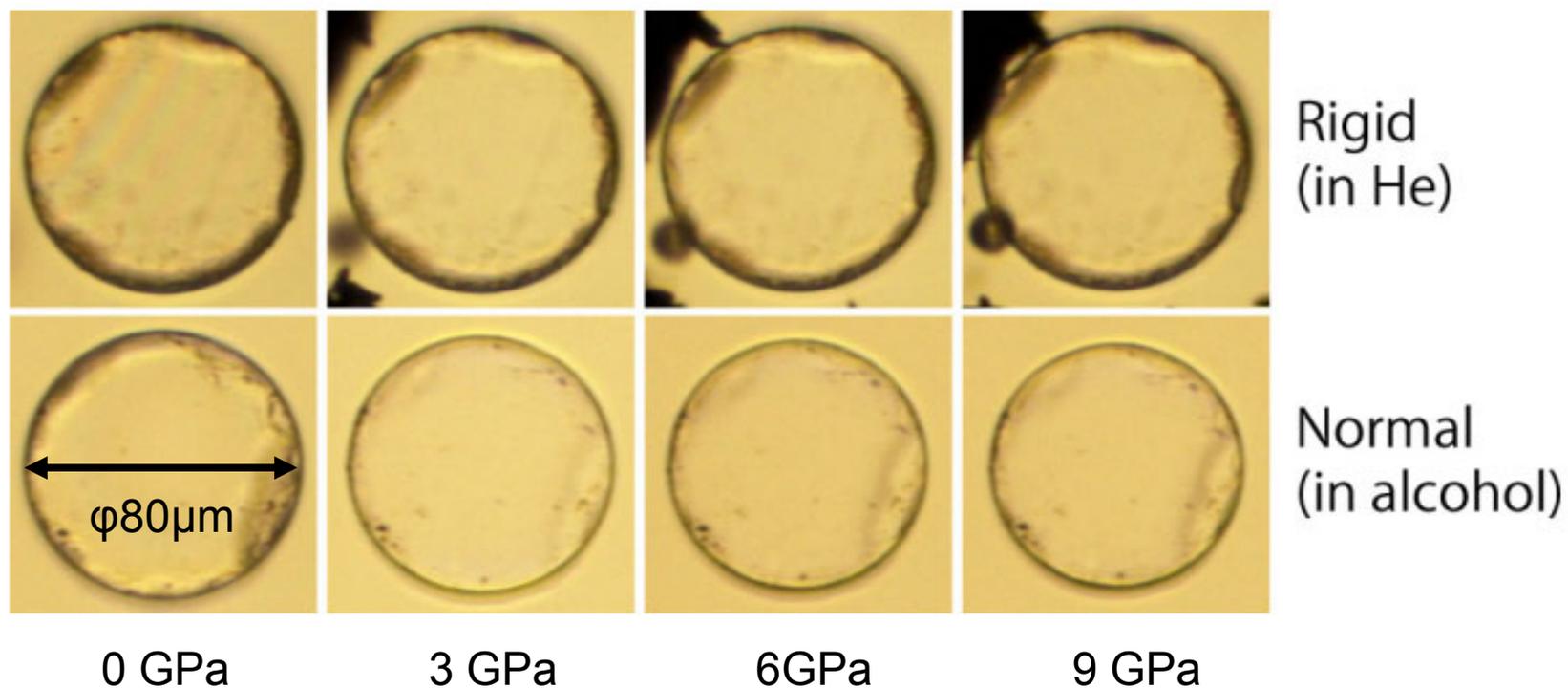
^dHigh-temperature assemblage was not observed in the sample recovered from run 3, probably because of erosion during thinning. Data for this assemblage are obtained from another sample prepared at the same pressure and temperature conditions.



Funamori *et al.*, JGR, 2000

III. 高圧下その場X線顕微鏡観察実現への期待

SiO₂ガラスの体積の圧力変化(光学顕微鏡観察)

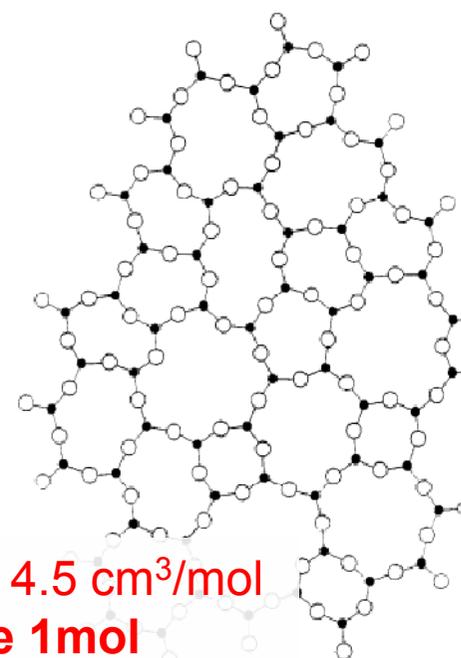
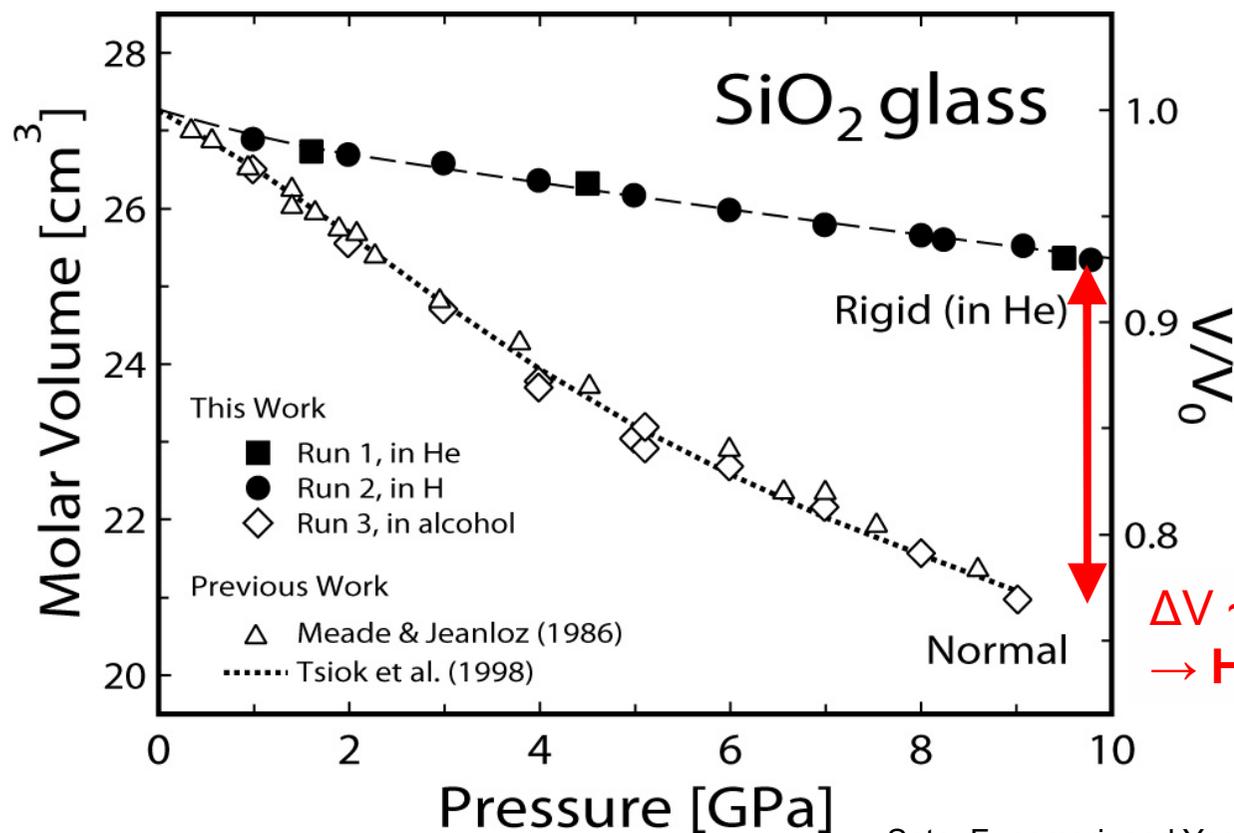


Sato, Funamori, and Yagi, Nature Communications, 2011

X線イメージング → 超高圧領域までの体積測定が可能に？

III. 高圧下その場X線顕微鏡観察実現への期待

SiO₂ガラスの体積の圧力変化



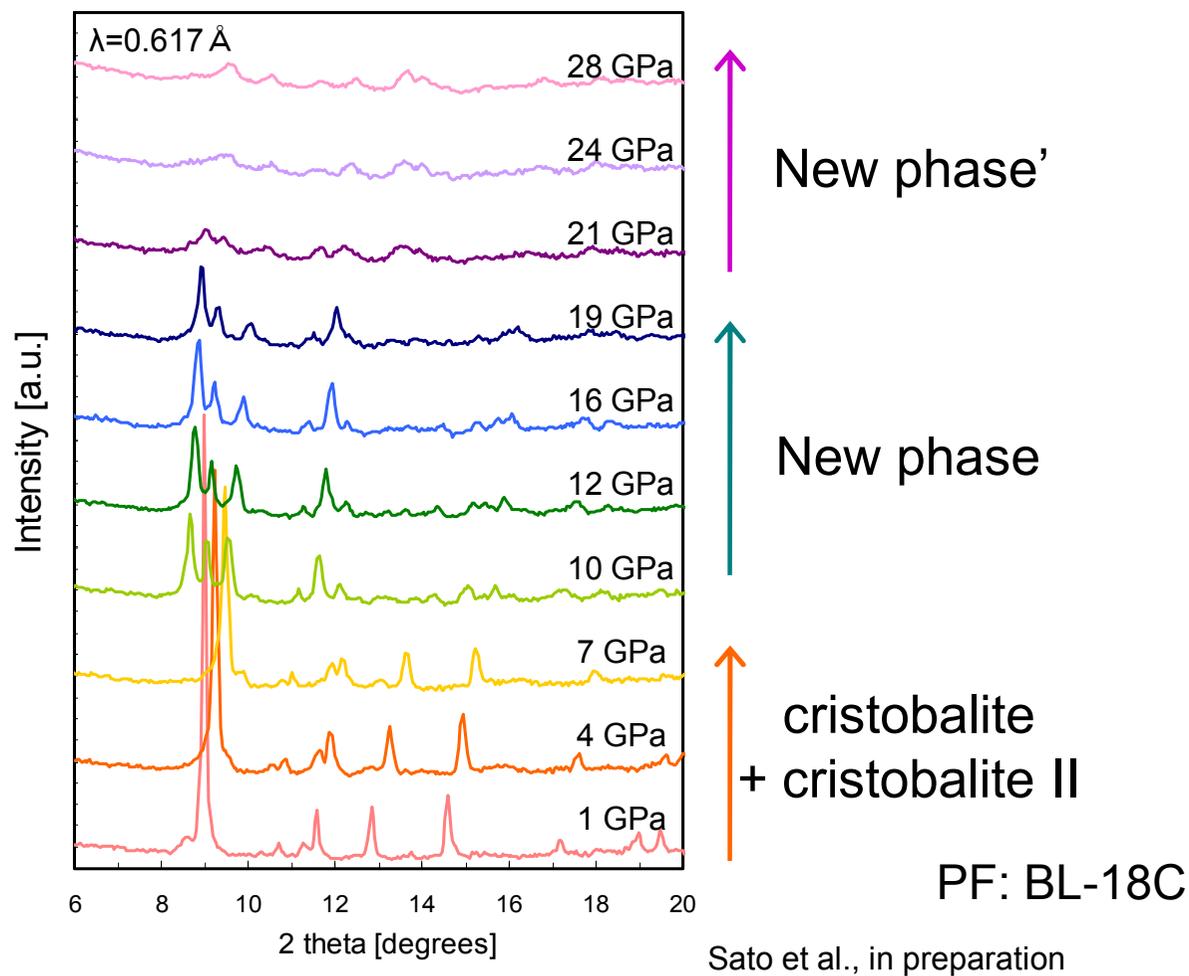
Zachariasen,
J. Am. Chem. Soc., 1932

Sato, Funamori, and Yagi, Nature Communications, 2011

空隙がHeに占有されている

III. 高圧下その場X線顕微鏡観察実現への期待

クリストバル石 Cristobalite : SiO_2



単結晶X線回折 → 格子定数・空間群の決定が可能に？

PF将来光源利用高圧科学WG

レーザー衝撃装置、ダイヤモンドアンビル装置、大型プレス装置などの
各種装置と次世代光源による高圧科学の新展開に向けた準備検討

浦川啓	岡山大学大学院自然科学研究科
亀卦川卓美	高エネルギー加速器研究機構
佐藤友子	広島大学大学院理学研究科
鈴木昭夫	東北大学大学院理学研究科
竹村謙一	物質・材料研究機構
永井隆哉	北海道大学大学院理学研究院
中野智志	物質・材料研究機構
中山敦子	新潟大学研究推進機構超域学術院
船守展正	東京大学大学院理学系研究科

(2011年4月現在)

2010年3月 PF高圧UG グループミーティングにてWGの立ち上げを決定

2010年4月 PF将来光源利用高圧科学WGとして発足

当初の主目的はKEK-Xの有効利用の検討

2010年10月 第1回放射光将来光源利用検討会議を開催(仙台市:参加者25名)

大石泰生氏(JASRI)によるSPring-8の高圧科学の将来展望に関する講演

主目的をERLの有効利用に変更

まとめ

- (1) 極高圧下その場X線回折: 未踏の圧力温度領域へ
500GPa超領域の実現へ
試料サイズは10 μ m未満に
- (2) 高圧下その場X線顕微鏡観察: 新技術が拓く高圧科学の新展開
イメージング(2次元・3次元)
→ 非晶質の密度、相転移のカイネティクス、レオロジー・拡散
単結晶X線回折 → 未知相の構造、軽元素の構造
化学組成分析 → 元素分配
試料粒径は10-100nm程度
- (3) その他: 各種高圧下その場測定の高度化
レーザーを用いた高温実験、クライオスタットを用いた低温実験
小角散乱測定
コリメータによる装置の幾何学的制約と寄生散乱からの解放