

SiO₂ガラスの超高压下における振る舞い

佐藤友子

広島大学 大学院理学研究科
地球惑星システム学専攻



I. はじめに

II. SiO₂ガラスの構造測定

III. SiO₂ガラスの密度測定

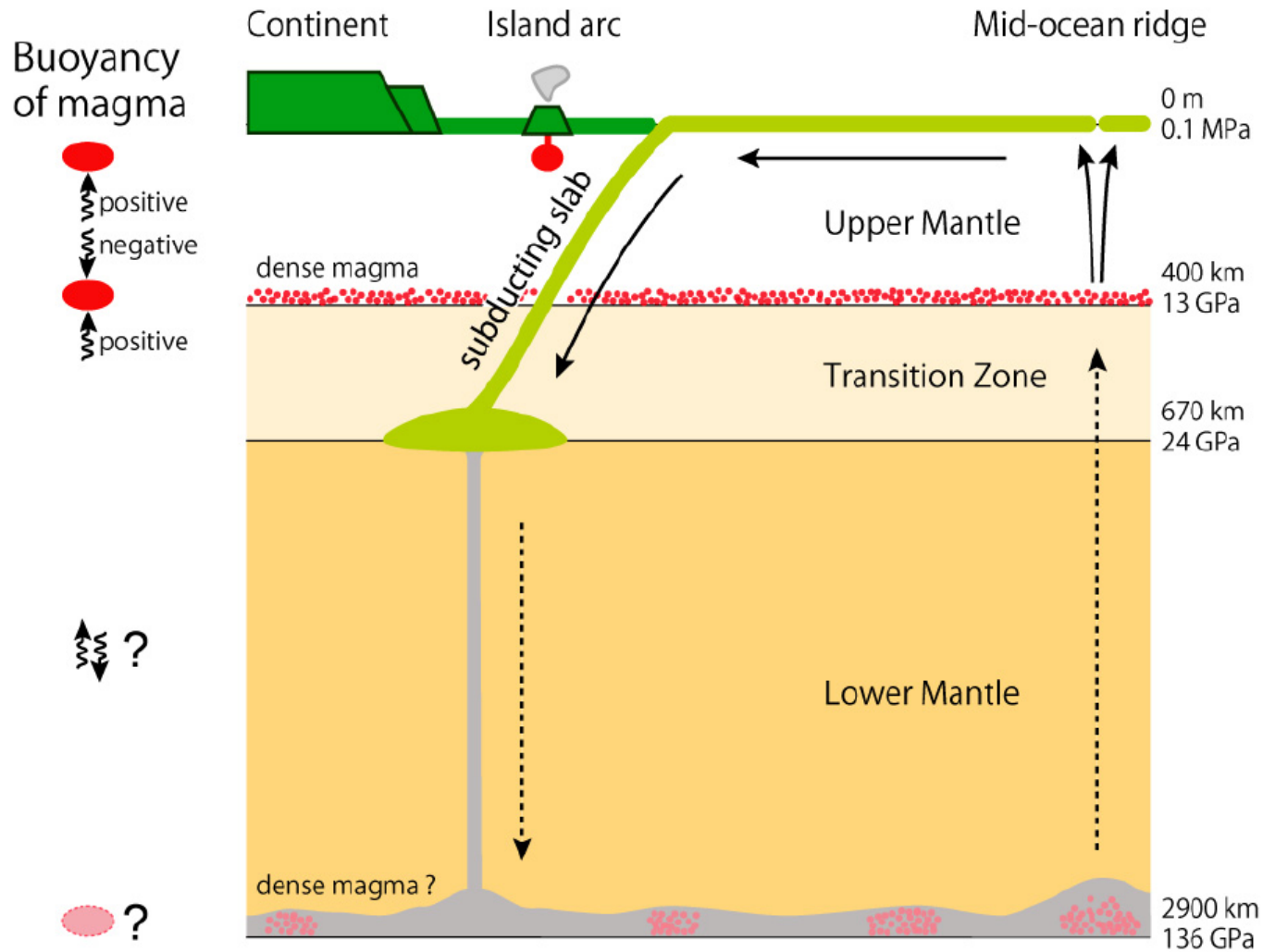
IV. SiO₂ガラスの降伏強度測定

V. He中でのSiO₂ガラスの異常な振る舞い

VI. まとめ

I. はじめに

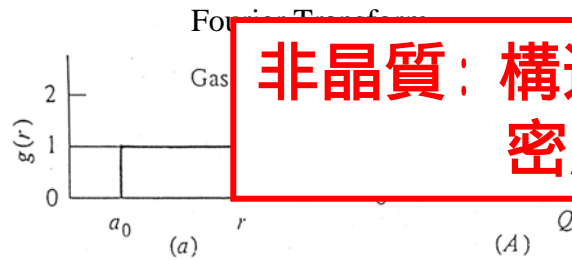
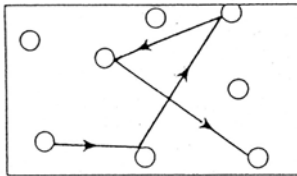
マントル中のメルト(マグマ)



I. はじめに

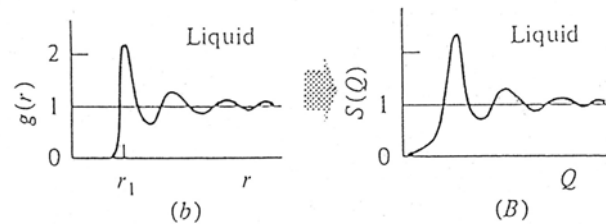
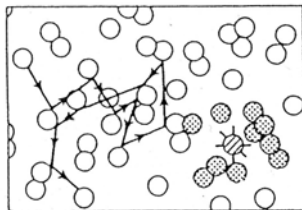
非晶質 (ガラス・液体) とは

Gas



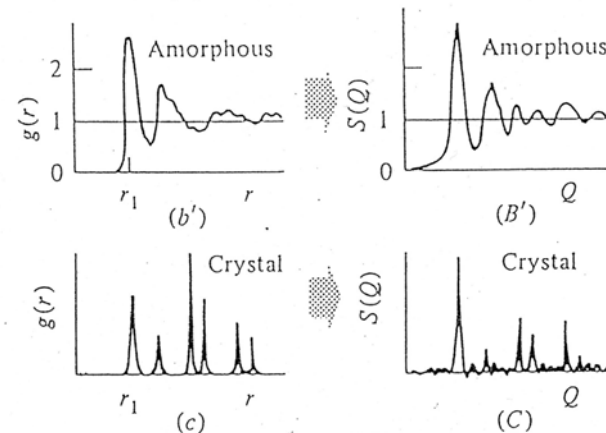
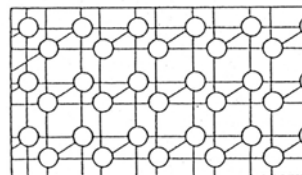
非晶質: 構造測定は困難
密度測定はさらに困難

Glass・Liquid



ガラス・液体:
短距離秩序
ブロードな回折パターン

Crystal

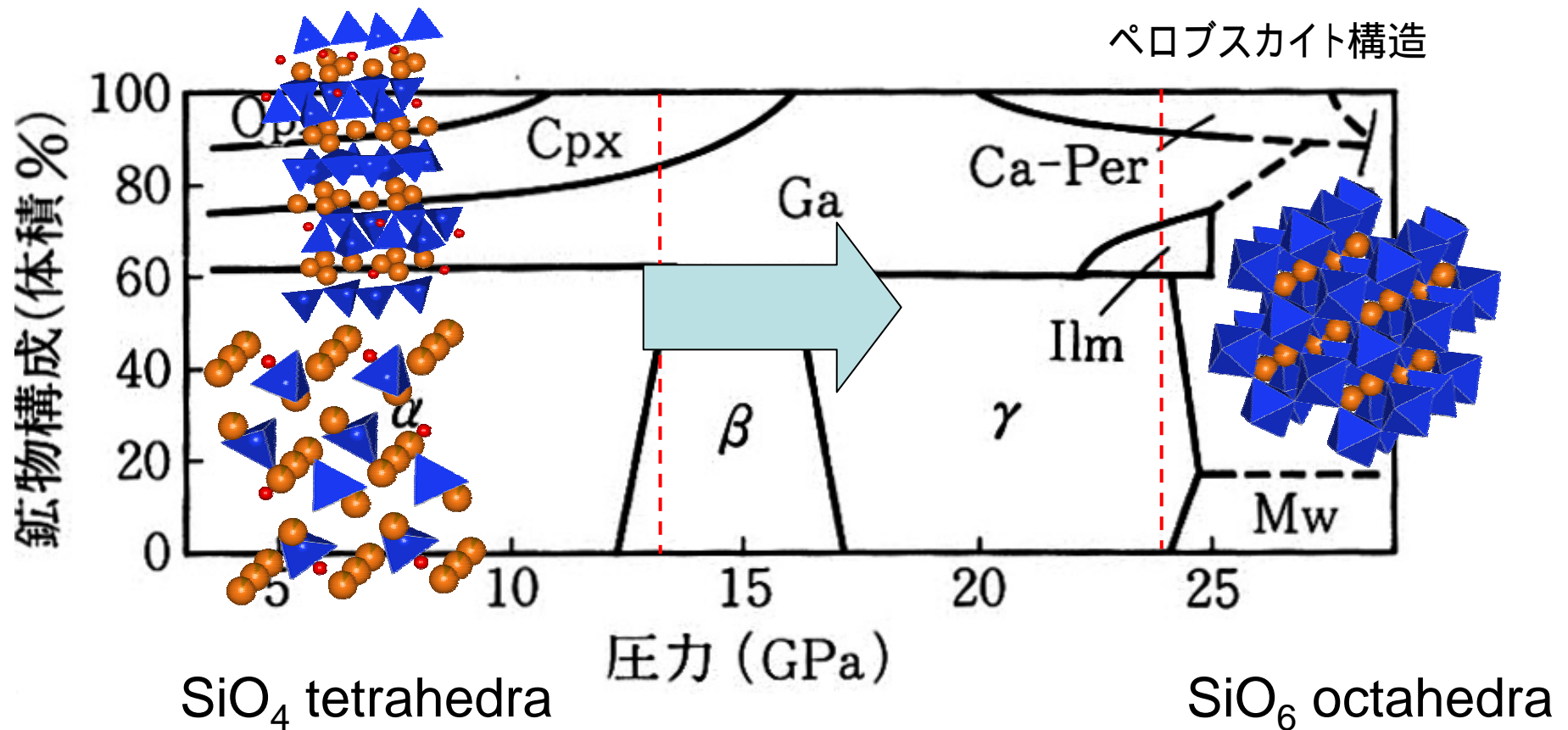


結晶:
長距離秩序
離散的な回折ピーク
三次元的な構造

I. はじめに

マントルの構成物質の相転移

パイロライト(pyrolite)組成 by Ringwood

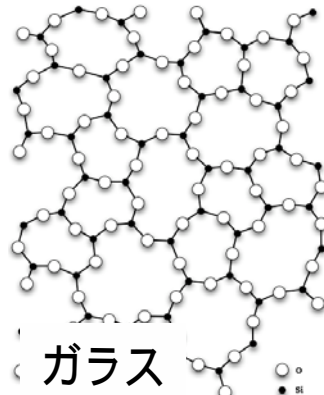
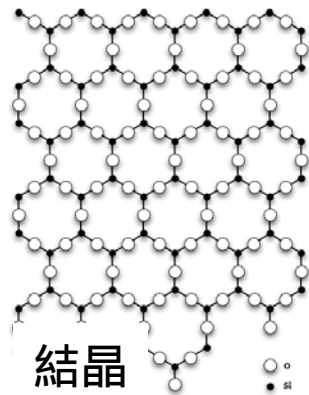


I. はじめに

非晶質とは

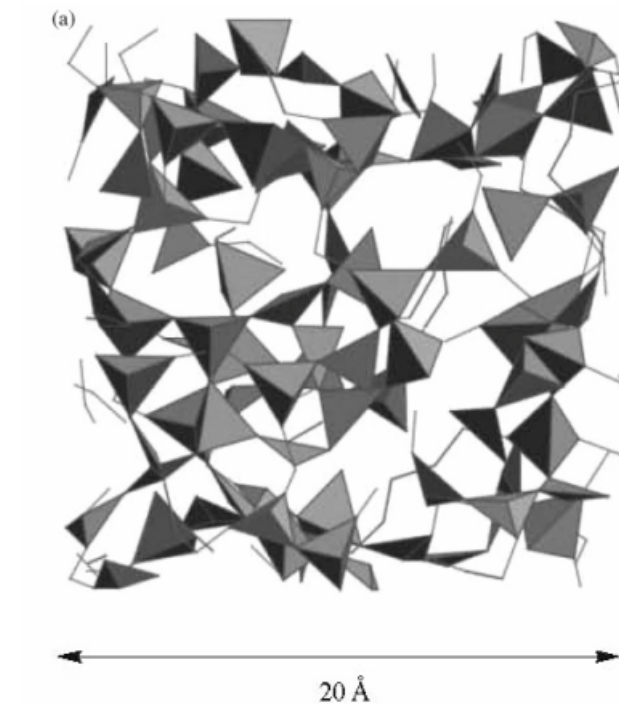
結晶 : 長距離秩序をもつ原子配列

非晶質 : 長距離秩序をもたない原子配列



SiO₂ガラスの重要性

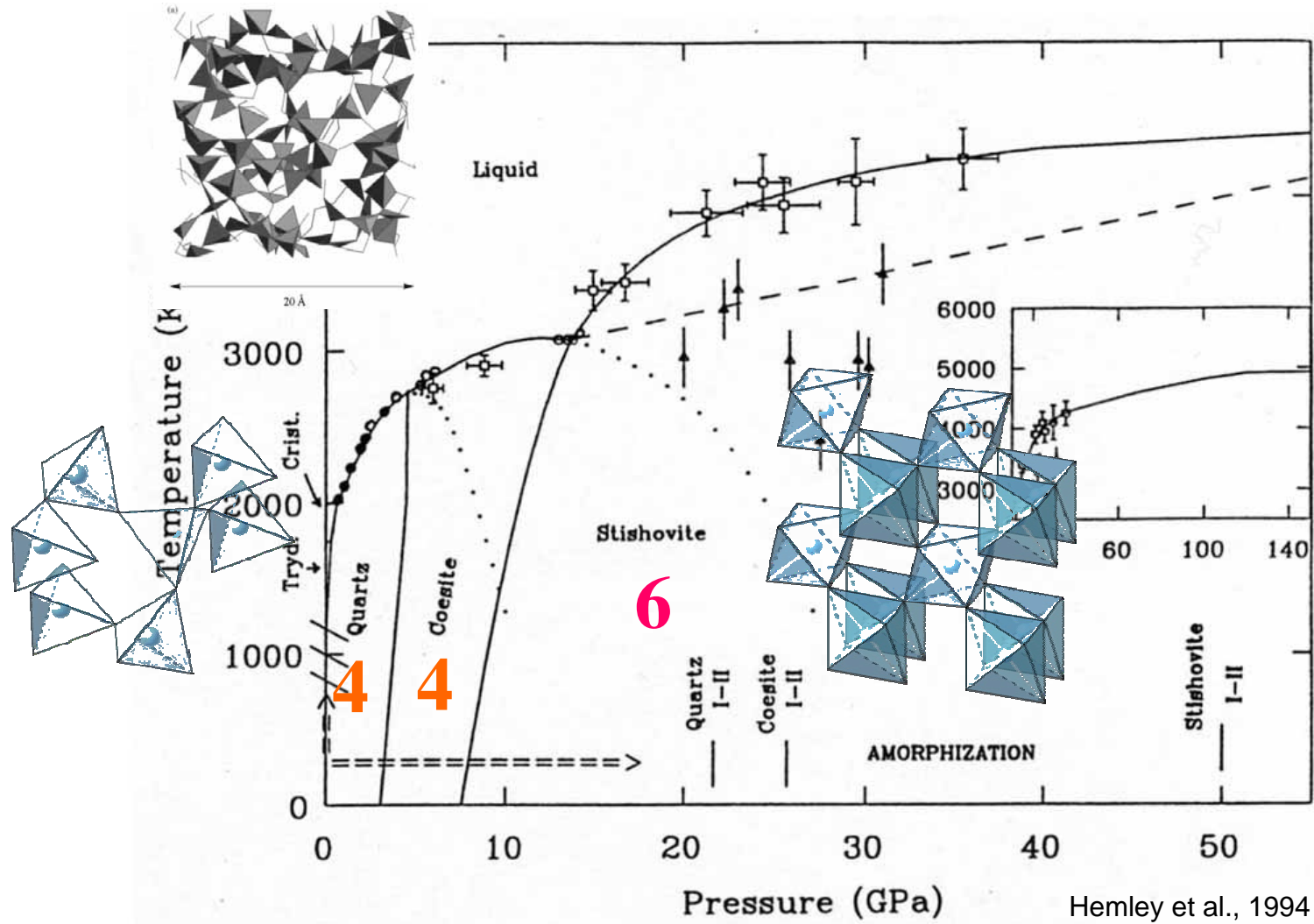
- ・凝縮系物理学
- ・材料科学
- ・地球科学



Kohara & Suzuya, 2005

I. はじめに

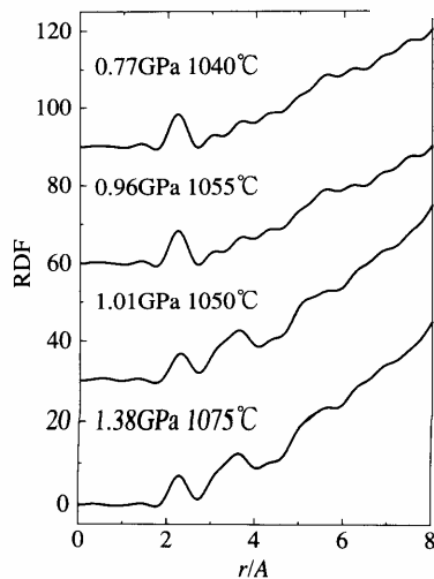
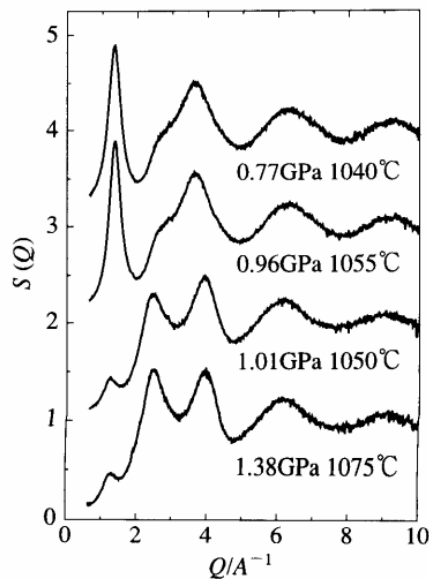
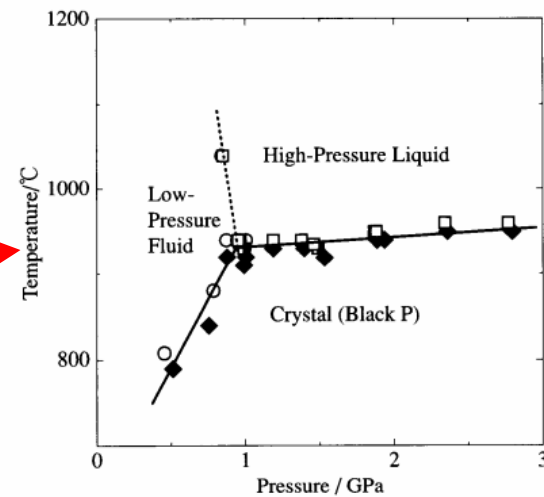
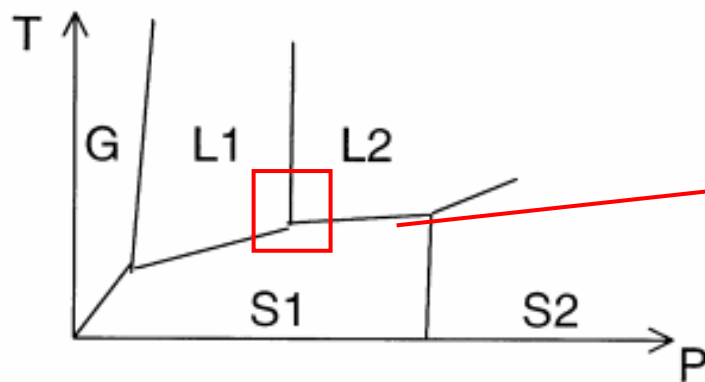
SiO₂の相図



I. はじめに

高圧下における非晶質-非晶質相転移

・リン



Katayama et al. (2000)

I. はじめに

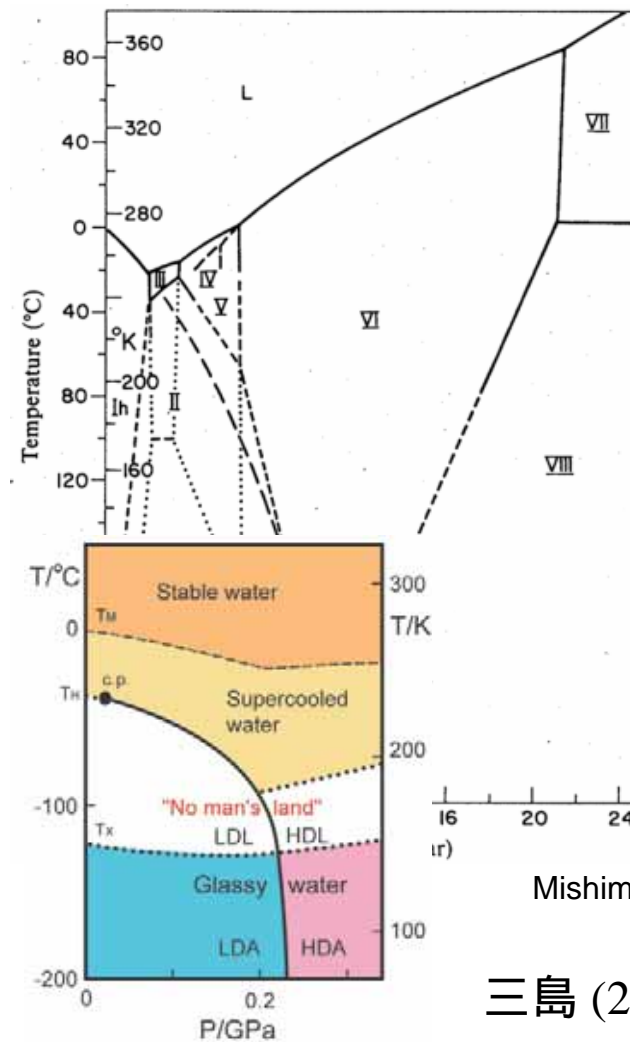
高圧下における非晶質-非晶質相転移

・アモルファス氷



http://www.nims.go.jp/water/j_index.html

“polyamorphism”

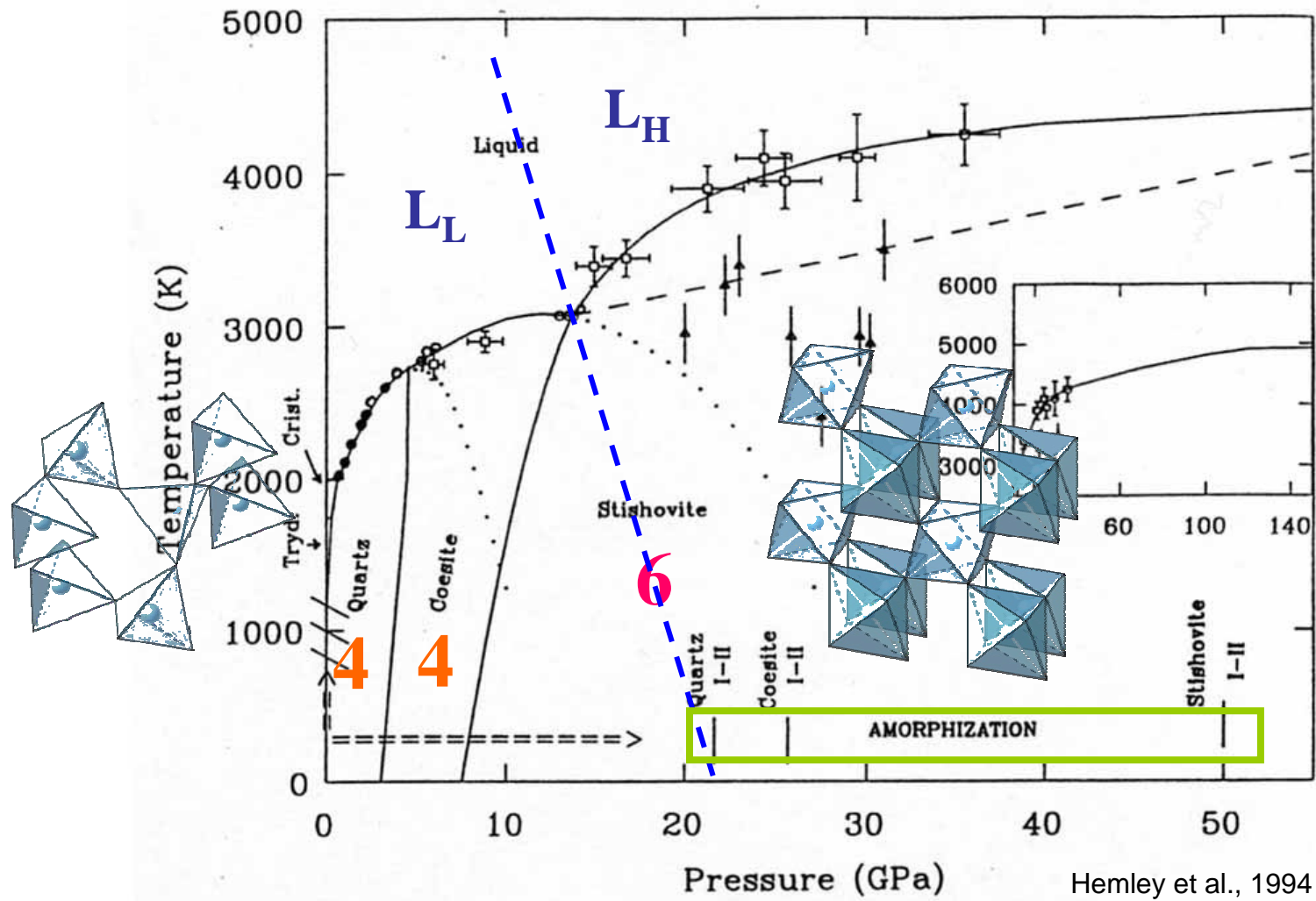


Mishima et al., 1984

三島 (2007)

I. はじめに

SiO₂の相図



I. はじめに

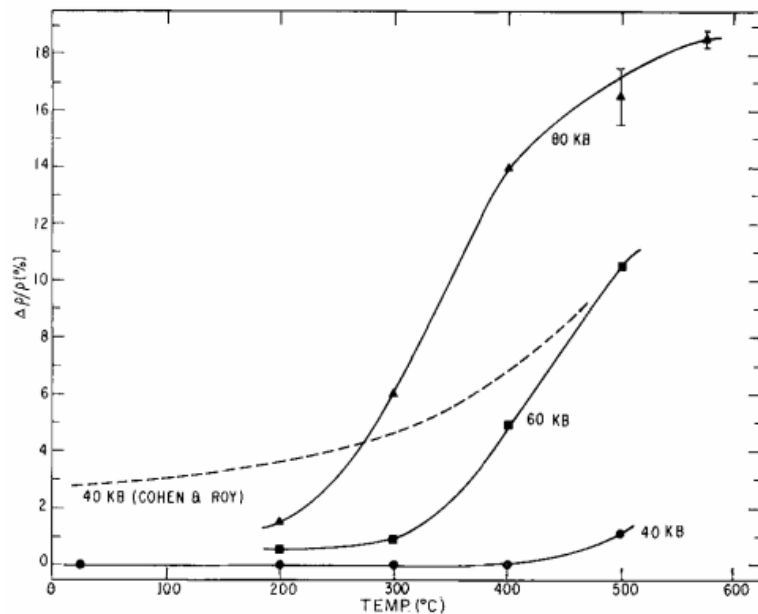
SiO₂ガラスに関する過去の研究

0~10GPa: 可逆な圧縮挙動 (4配位)

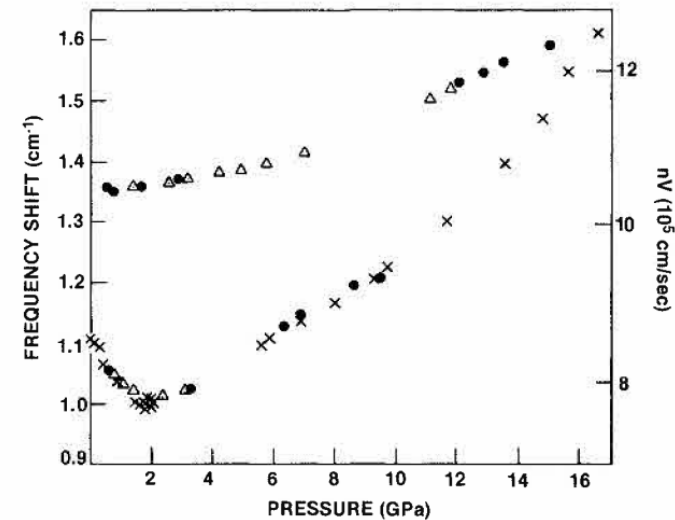
>10GPa: 不可逆な収縮 永久高密度化(4配位)

SiO₂ガラスの構造: Zachariasen (1932)

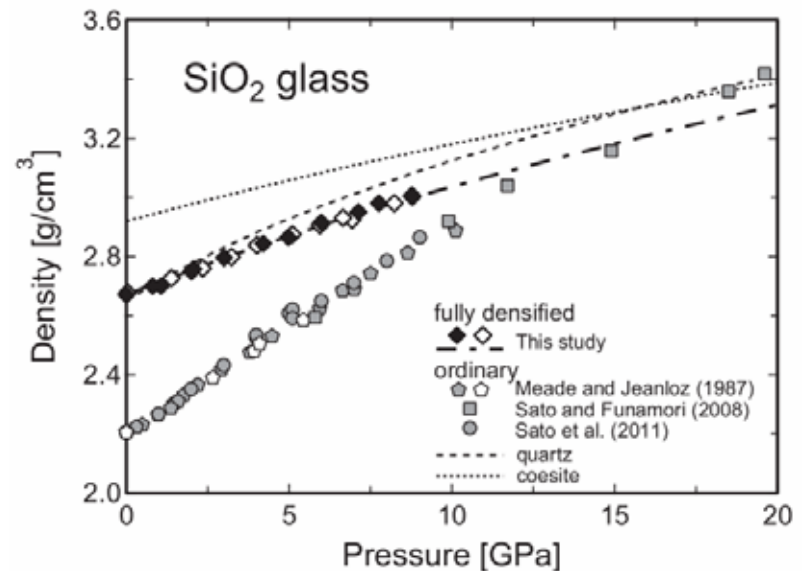
永久高密度化: Bridgman (1939)



Mackenzie, 1963



Grimsditch, 1984



Wakabayashi et al., 2011

I. はじめに

SiO₂ガラスに関する過去の研究

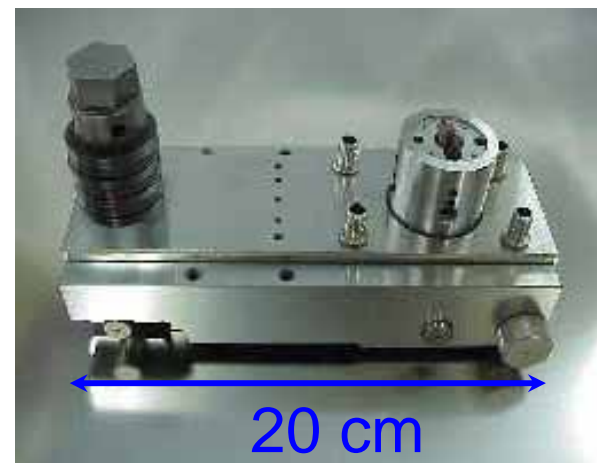
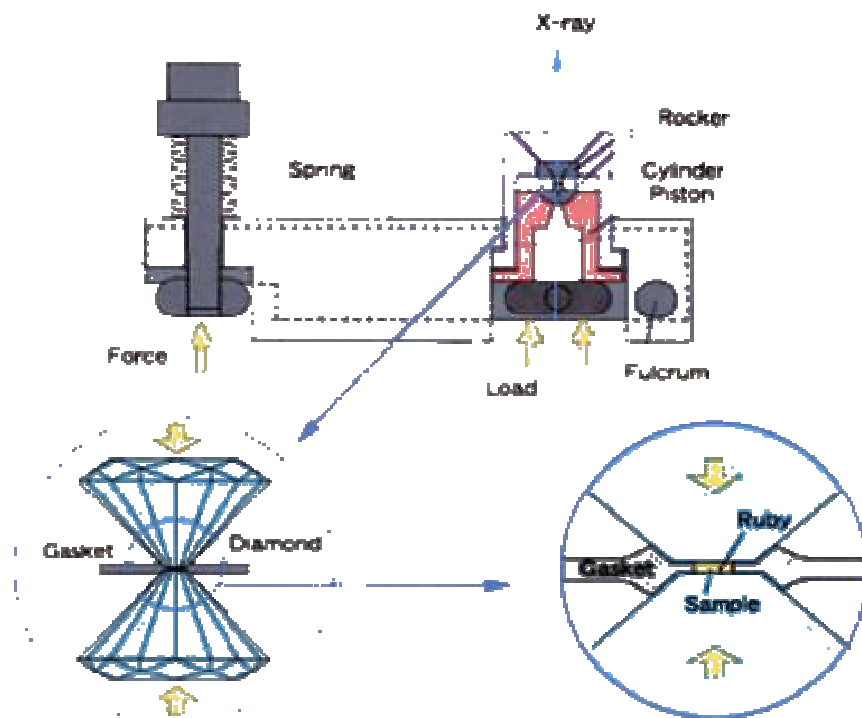
20GPa以上の圧力領域における研究

	手法	最高圧力	結果
Hemley et al. (1986)	Raman scattering	40 GPa	20 GPa以上で4 6配位の相転移
Williams and Jeanloz (1988)	Infrared absorption	40 GPa	20 GPa以上で4 6配位の相転移
Meade and Jeanloz (1988)	Yield strength	80 GPa	25GPa以上で大きな変化がおこる
Meade et al. (1992)	X-ray diffraction	40 GPa	8-28GPaの間で4 6配位の相転移が始まる
Zha et al. (1994)	Brillouin scattering	60 GPa	12-23GPaの間で大きな変化がおこる
Inamura et al. (2004)	X-ray diffraction	20 GPa	20GPaまでは4配位のまま
Lin et al. (2007)	X-ray Raman scattering	50 GPa	10-20GPaで4 6配位の相転移
Fukui et al. (2008)	X-ray Raman scattering	70 GPa	70GPaまで6配位にはならない
Murakami and Bass (2009)	Brillouin scattering	200 GPa	40 GPaから140 GPaまで6配位
Benmore et al. (2010)	X-ray diffraction	40 GPa	15~40 GPaで4 6配位の相転移

I. はじめに

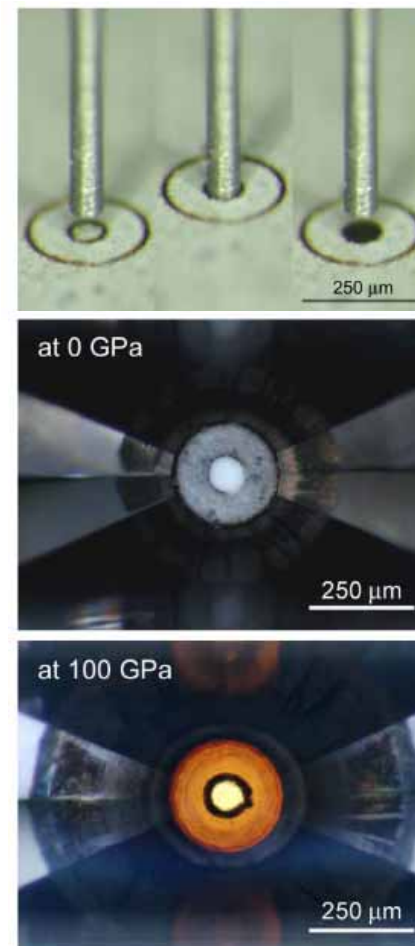
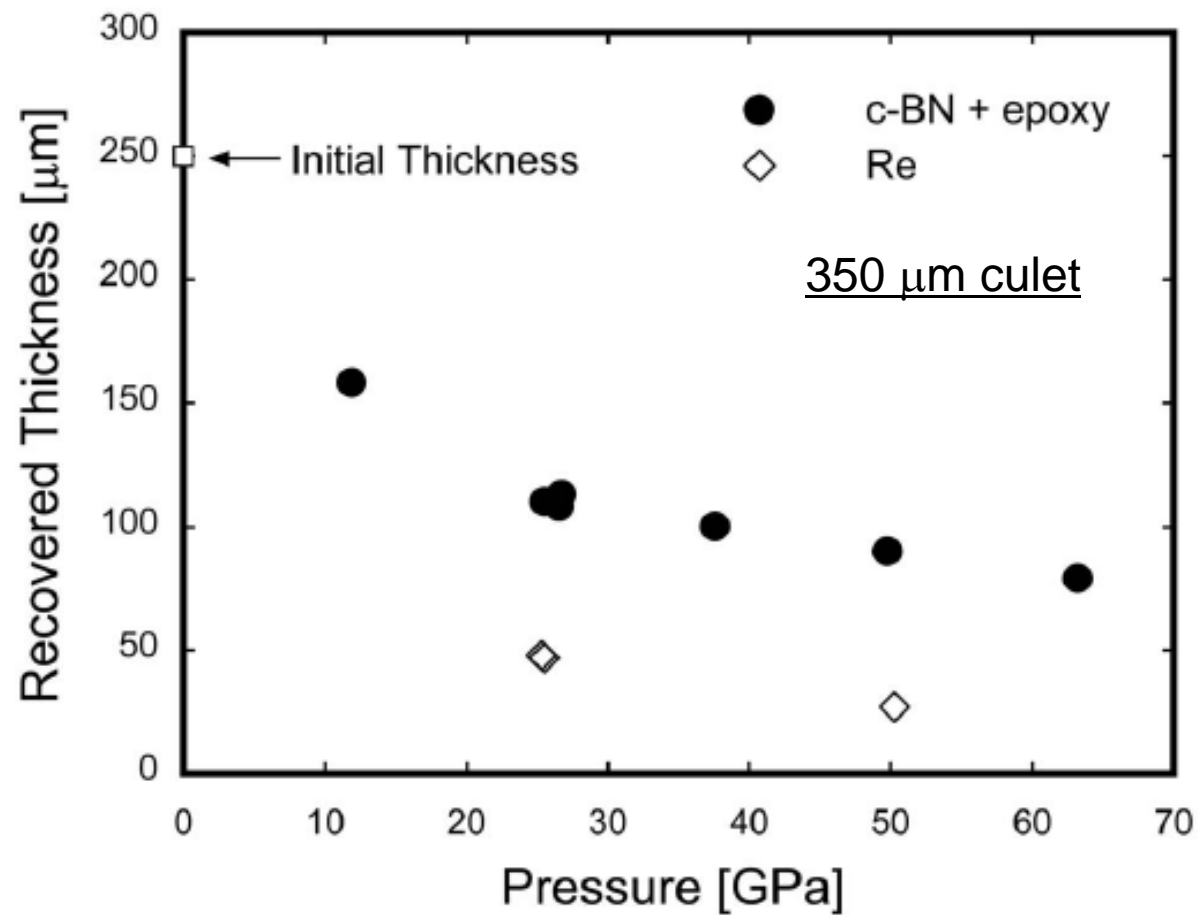
ダイヤモンドアンビル装置 (DAC) と放射光の組み合わせを用いた非晶質を対象とする高圧下その場実験技術の開発

- ・ c-BNガスケット (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)



I. はじめに

c-BNガasket





I. はじめに

II. SiO₂ガラスの構造測定

III. SiO₂ガラスの密度測定

IV. SiO₂ガラスの降伏強度測定

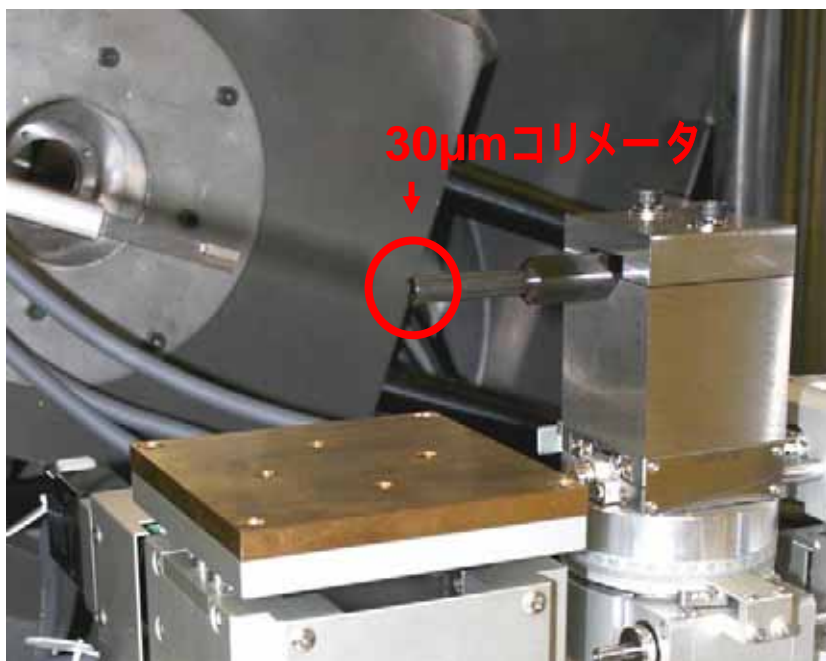
V. He中でのSiO₂ガラスの異常な振る舞い

VI. まとめ

II. 構造測定

実験概要

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



II. 構造測定

実験概要

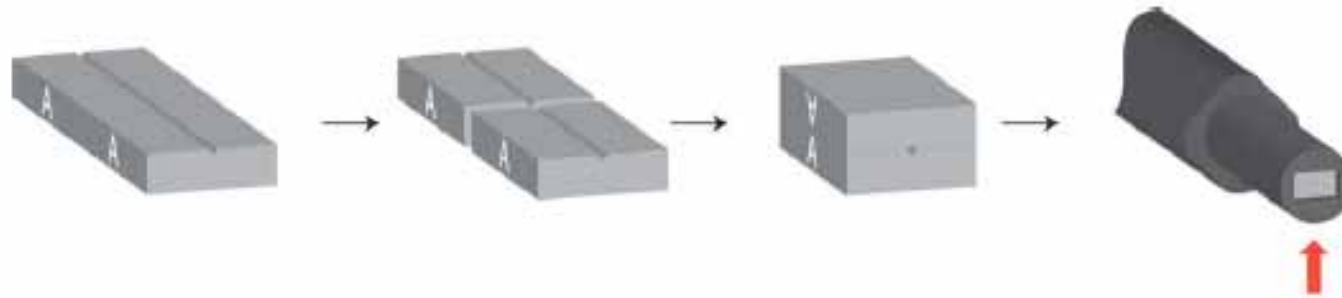
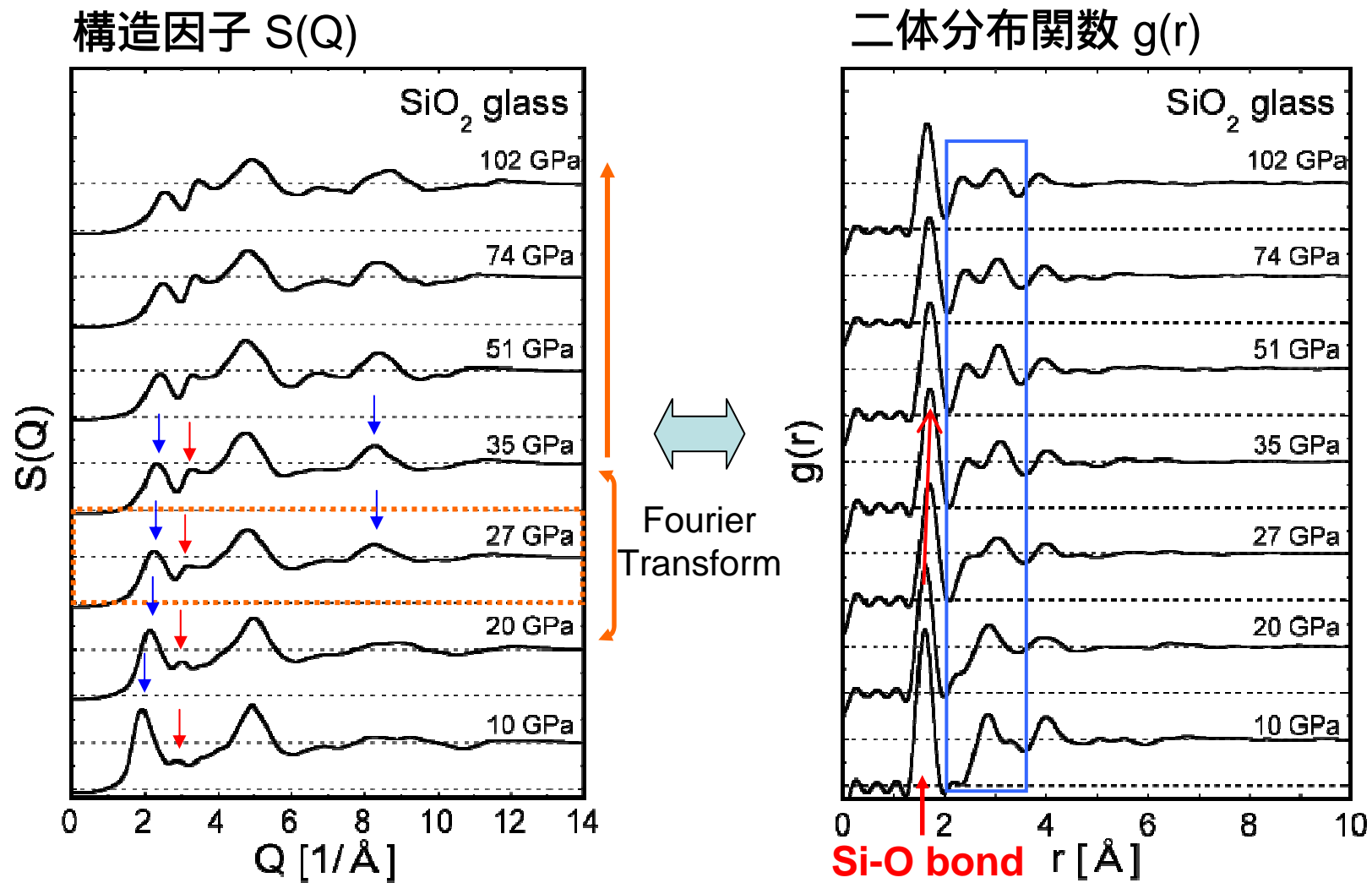


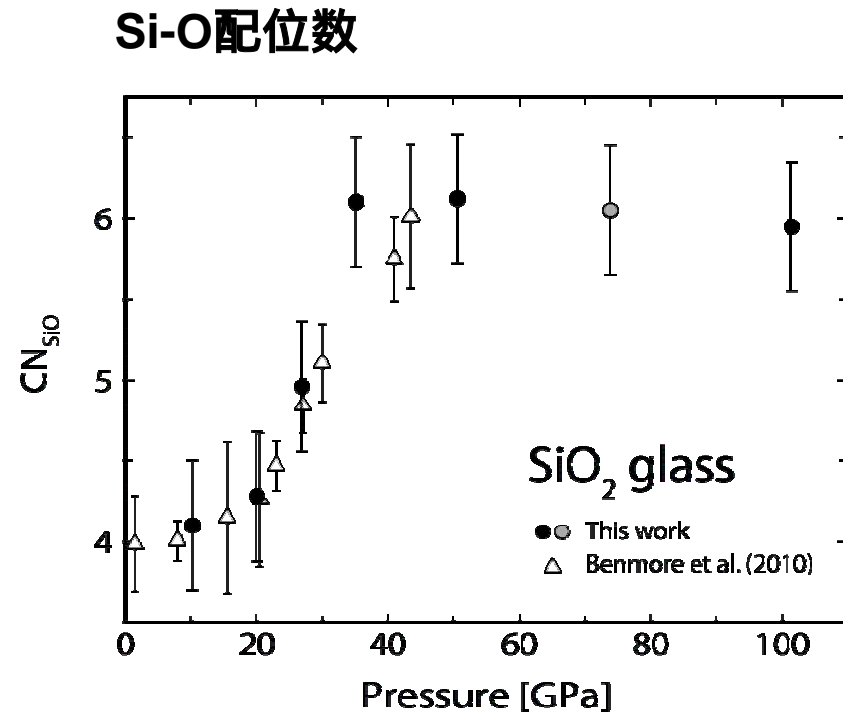
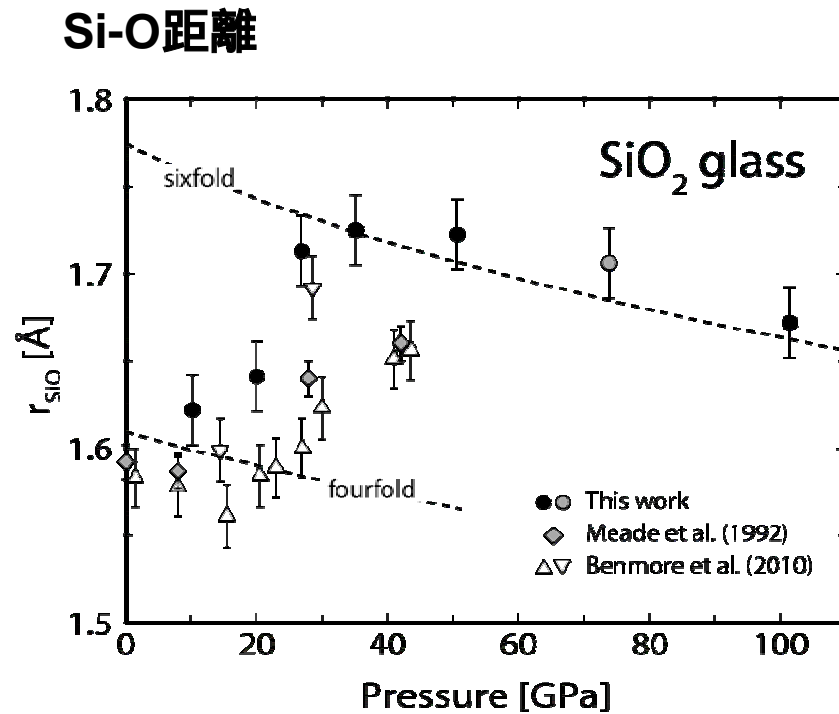
FIG. 1. (Color online) Schematic illustrations of the entrance collimator. A semicircular groove of $30\ \mu\text{m}$ in diameter was carved on a tungsten carbide plate of 20 mm length precisely parallel to the AA plane (reference plane). To make a hole of $30\ \mu\text{m}$ in diameter and 10 mm in thickness, 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.

II. 構造測定

SiO₂ガラスのS(Q)とg(r)



II. 構造測定



20-35 GPa: 4配位から6配位への構造変化
~ 100 GPa: 6配位の構造を保つ



I. はじめに

II. SiO₂ガラスの構造測定

III. SiO₂ガラスの密度測定

IV. SiO₂ガラスの降伏強度測定

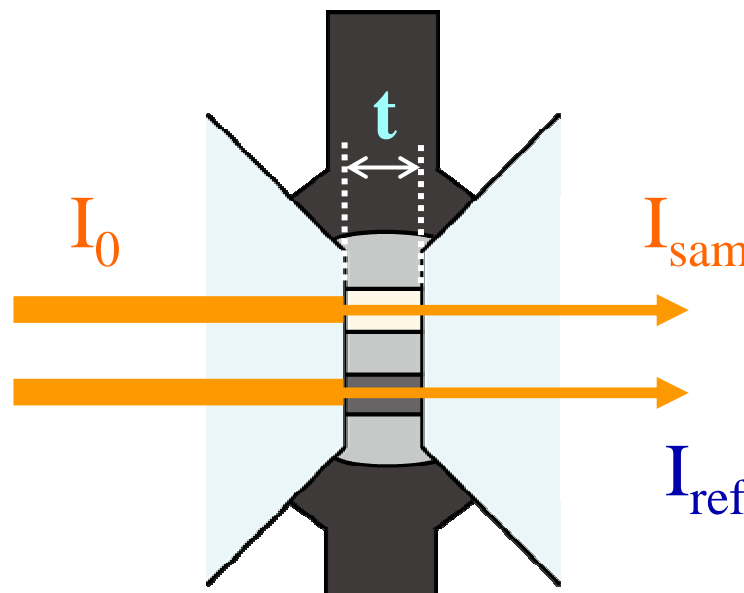
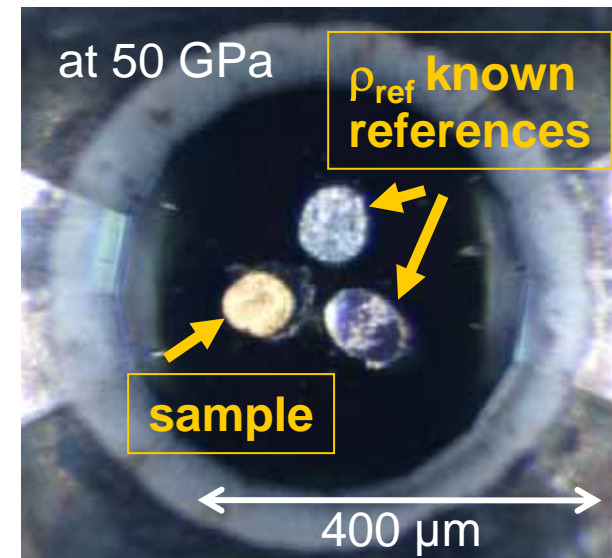
V. He中でのSiO₂ガラスの異常な振る舞い

VI. まとめ

III. 密度測定

実験概要

- ・単色X線を用いたX線吸収法
- ・BL-18C (Photon Factory)
- ・二つの参照物質を用いる
- ・50 GPa超までの測定

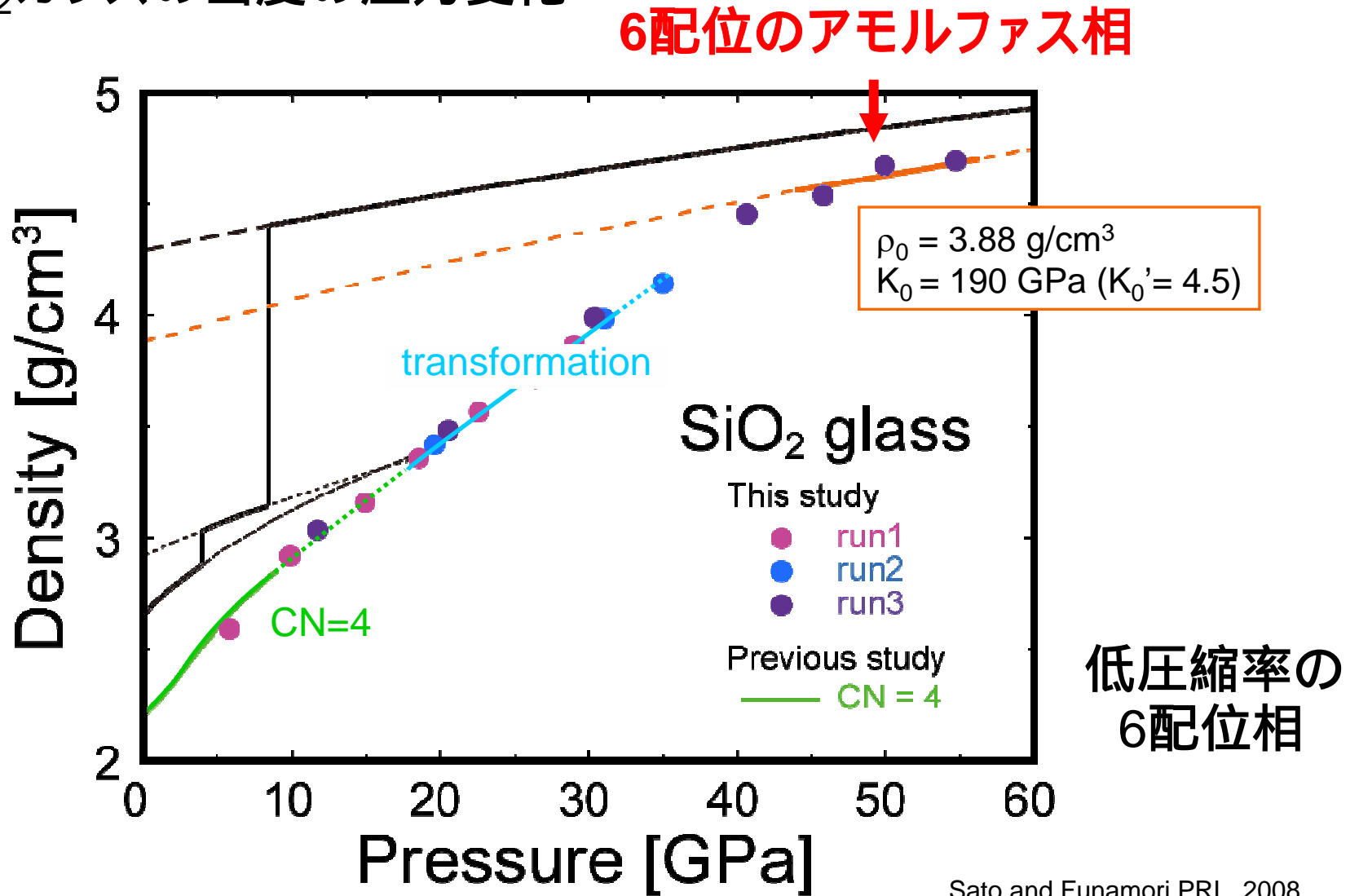


$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu_{\text{dia}} \rho_{\text{dia}} t_{\text{dia}}) \cdot \exp(-\mu \rho t)$$

$$\rho_{\text{sample}} = \mu_{\text{ref1}} \rho_{\text{ref1}} / \mu_{\text{sample}} + \ln(I_{\text{ref1}} / I_{\text{sample}}) / \ln(I_{\text{ref2}} / I_{\text{ref1}}) \cdot (\mu_{\text{ref2}} \rho_{\text{ref2}} - \mu_{\text{ref1}} \rho_{\text{ref1}}) / \mu_{\text{sample}}$$

III. 密度測定

SiO₂ガラスの密度の圧力変化





I. はじめに

II. SiO₂ガラスの構造測定

III. SiO₂ガラスの密度測定

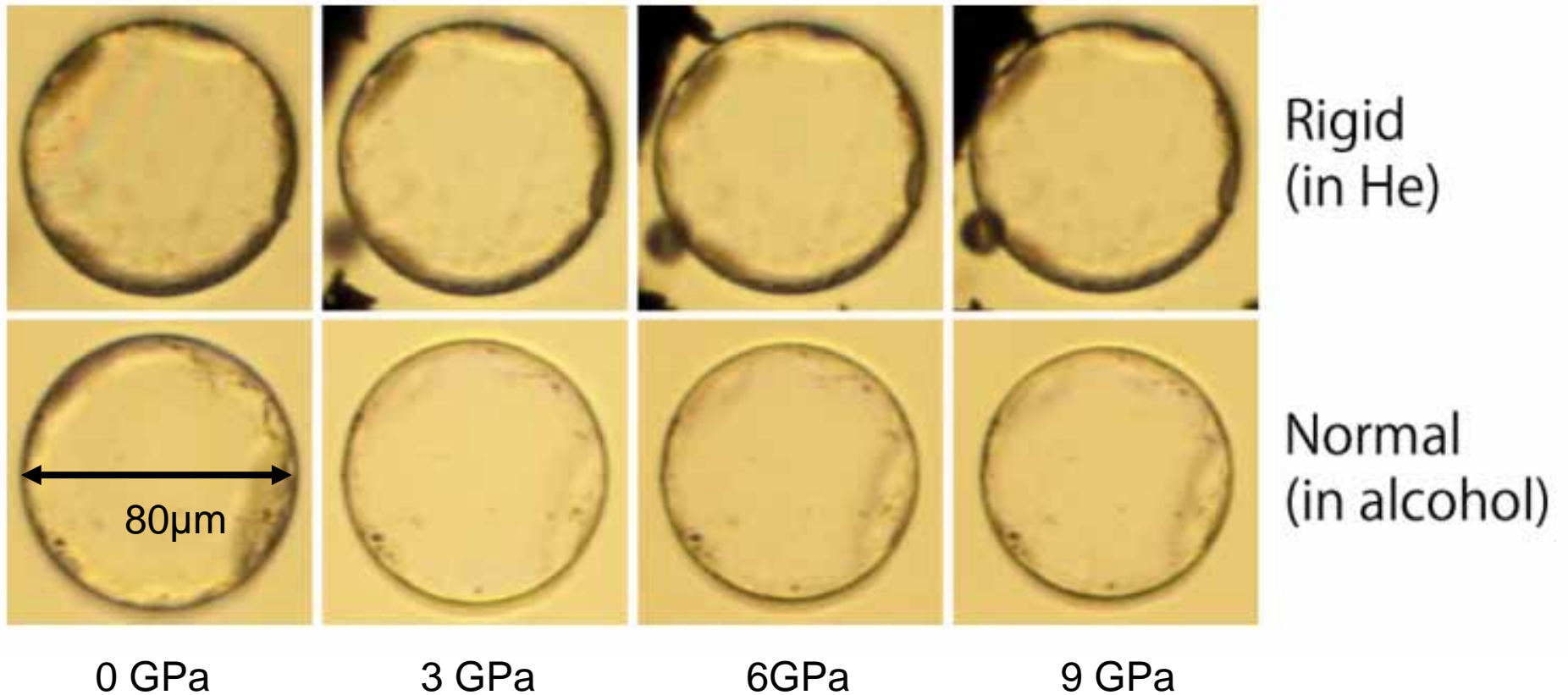
IV. SiO₂ガラスの降伏強度測定

V. He中でのSiO₂ガラスの異常な振る舞い

VI. まとめ

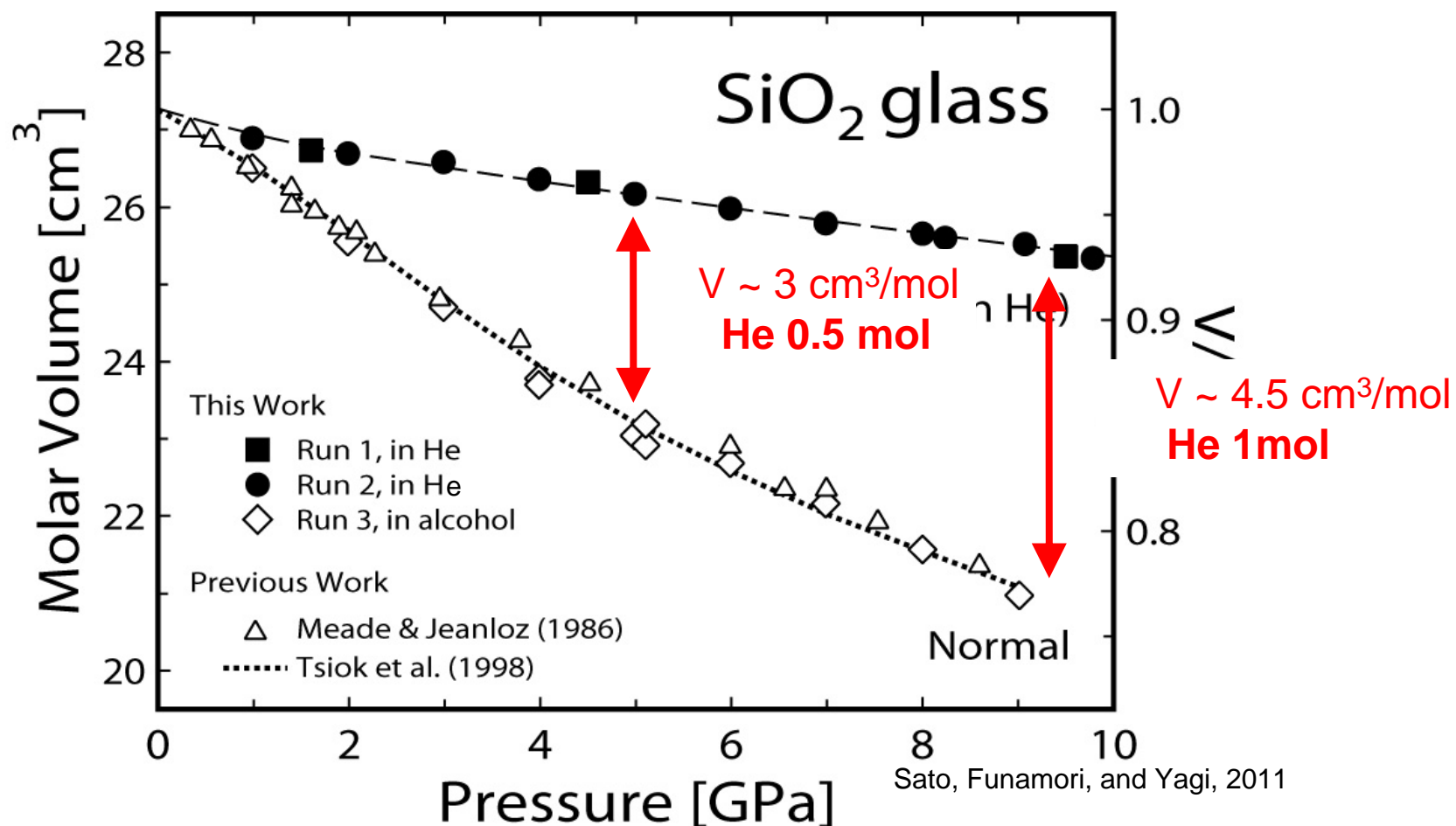
V. He中での振る舞い

He中でのSiO₂ガラスの振る舞い



V. He中での振る舞い

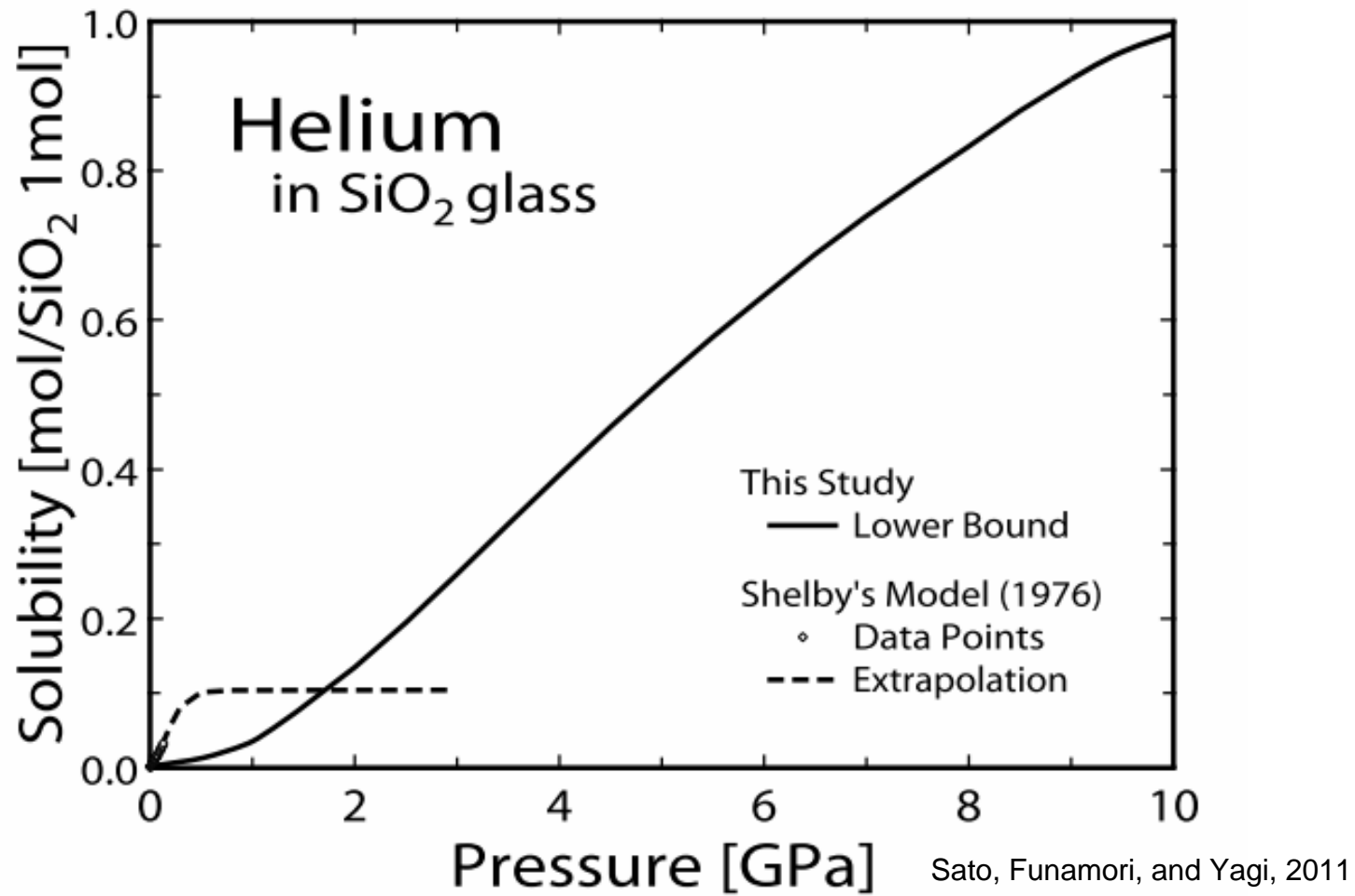
SiO₂ガラスの体積の圧力変化



空隙がHeに占有されている

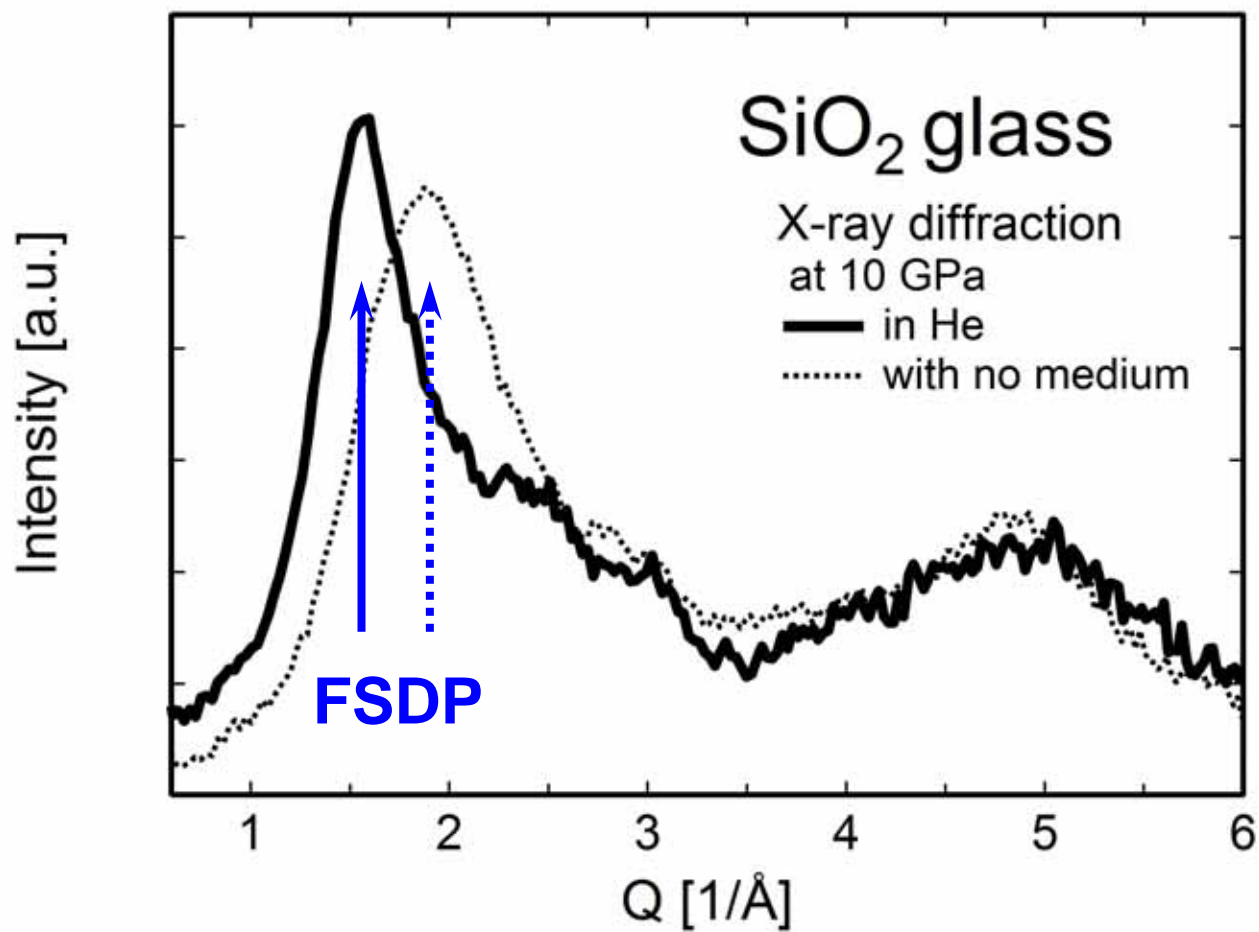
V. He中での振る舞い

Heの溶解量の最小値の見積もり



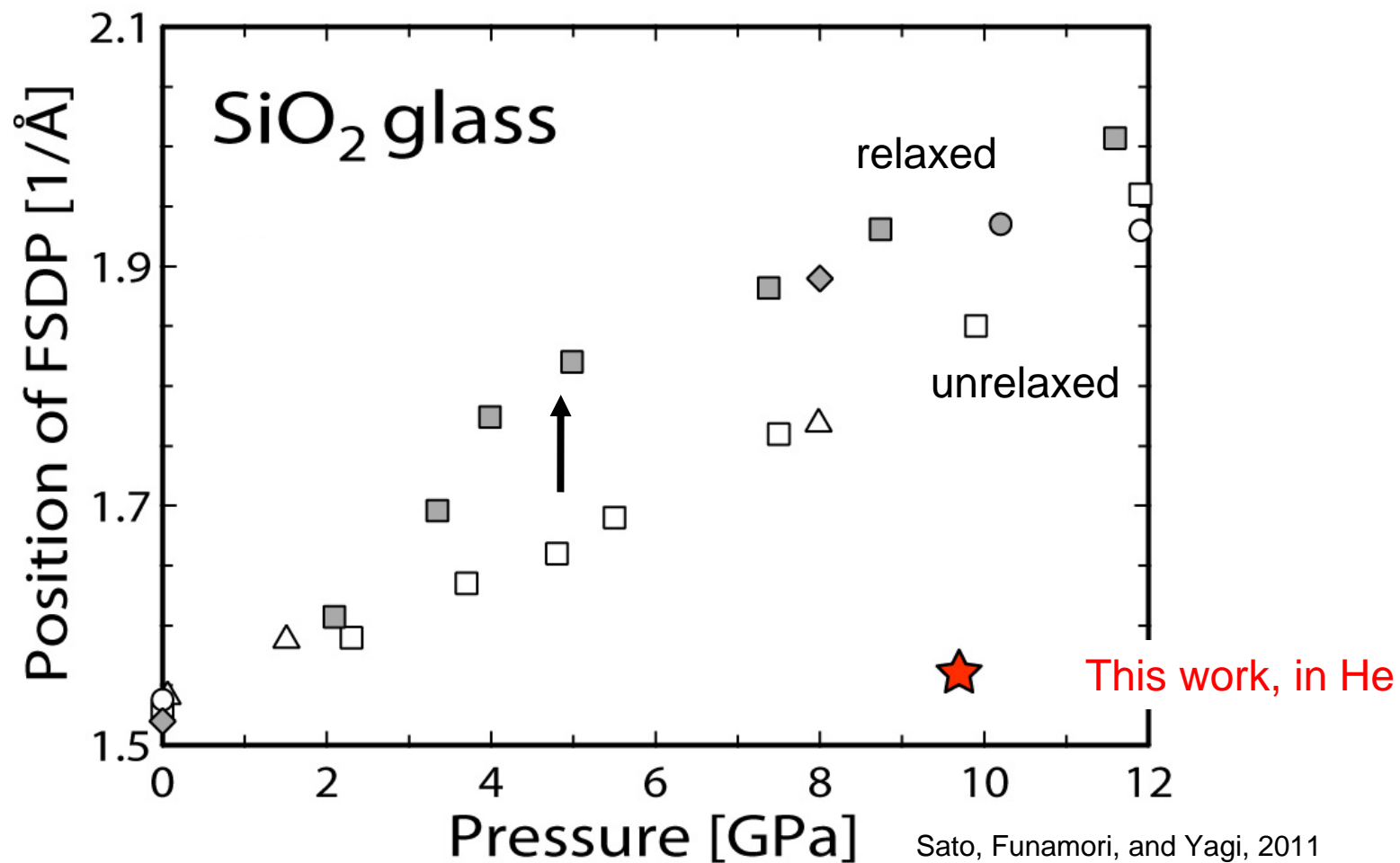
V. He中での振る舞い

X線回折パターン



V. He中での振る舞い

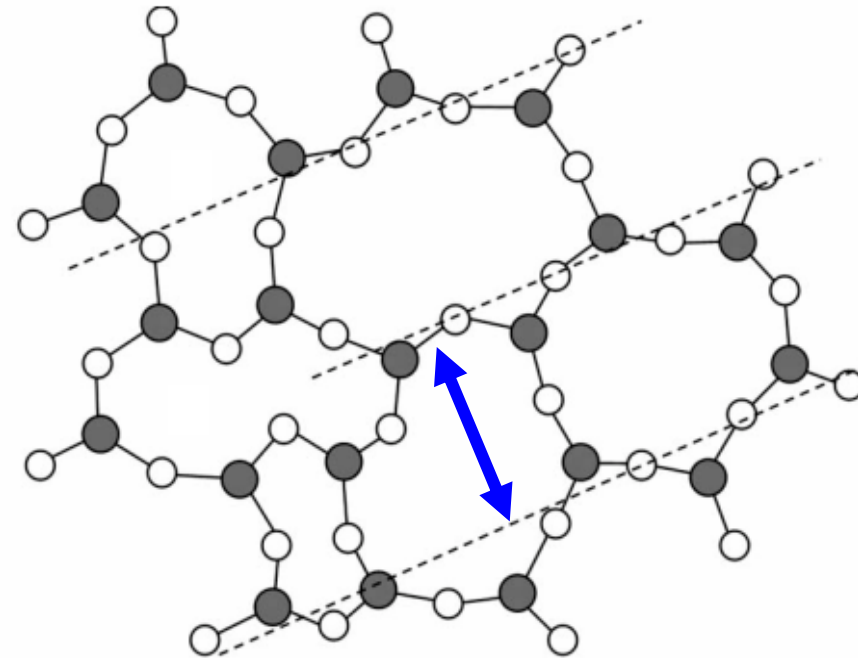
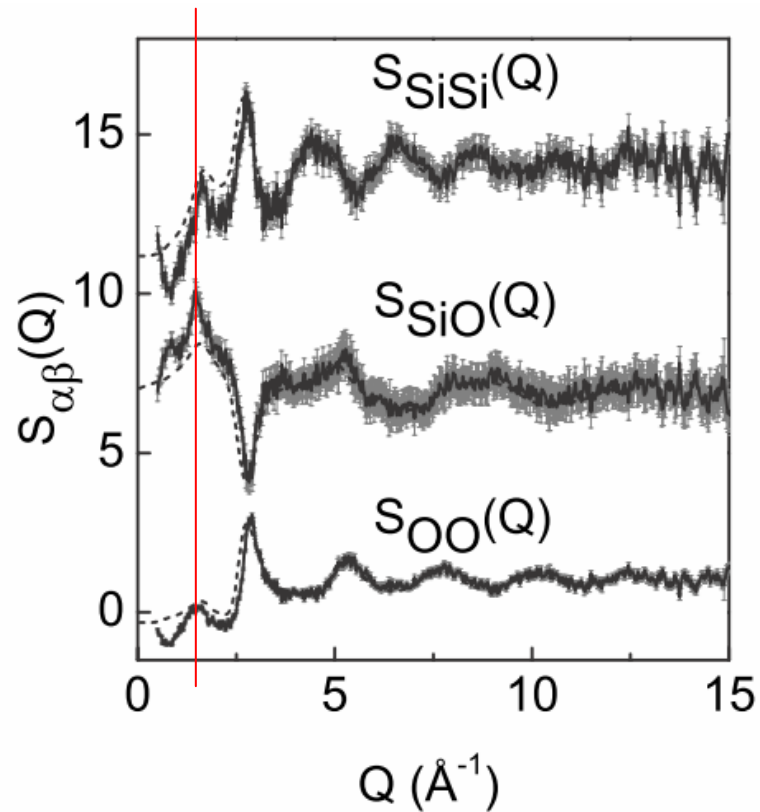
FSDPの位置の圧力変化



フレームワークの変化が小さい

V. He中での振る舞い

FSDP: 中距離構造を反映



$Q=1.5 \text{ \AA}^{-1}$ (at 0 GPa)
 4.2 \AA in real space

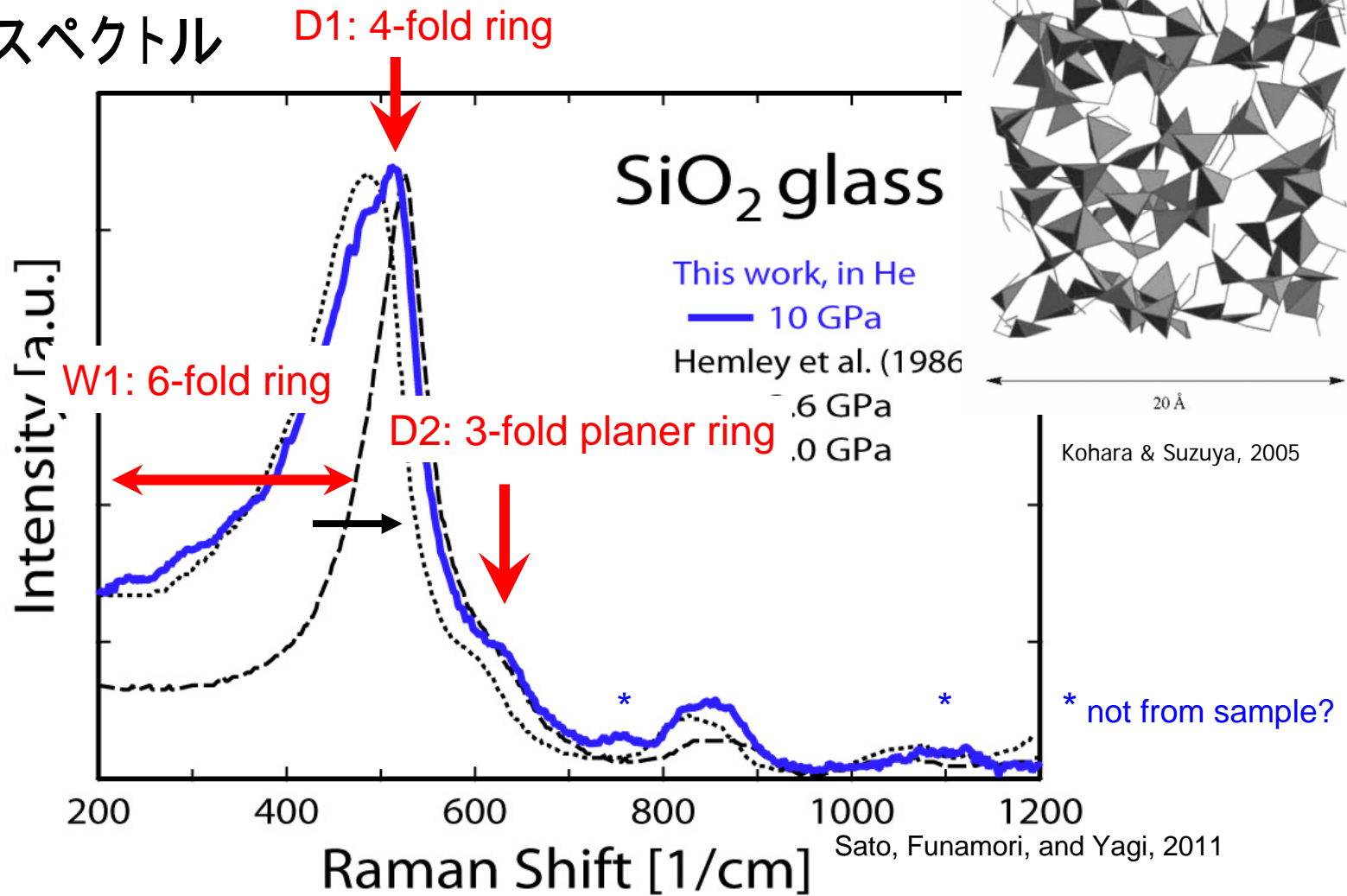
Modified from Mei et al. (2008)

$r_{\text{He}} \sim 1.3 \text{ \AA}$

SiO₂ ガラス中の空隙がHeに占有されている？

V. He中での振る舞い

ラマンスペクトル



Small ring

Compressible

Large ring

Incompressible



I. はじめに

II. SiO₂ガラスの構造測定

III. SiO₂ガラスの密度測定

IV. SiO₂ガラスの降伏強度測定

V. He中でのSiO₂ガラスの異常な振る舞い

VI. まとめ

SiO₂ガラスの高圧下における振る舞い

- ・20-35 GPaで4配位から6配位への構造変化が起こる
- ・4配位の構造および構造変化中は高い圧縮率を示す
- ・6配位の構造は少なくとも100GPaまで続き、低い圧縮率を示す
- ・6配位の構造は、高い降伏強度を持つ可能性がある

He中でのSiO₂ガラスの振る舞い

- ・He中では圧縮率が大きく低下
 - ・高圧下では大量のHeがSiO₂ガラスの空隙中に入り込む
-