

小角散乱法による超電導線材中の 人工ピンの解析

大場 洋次郎 (JAEA)

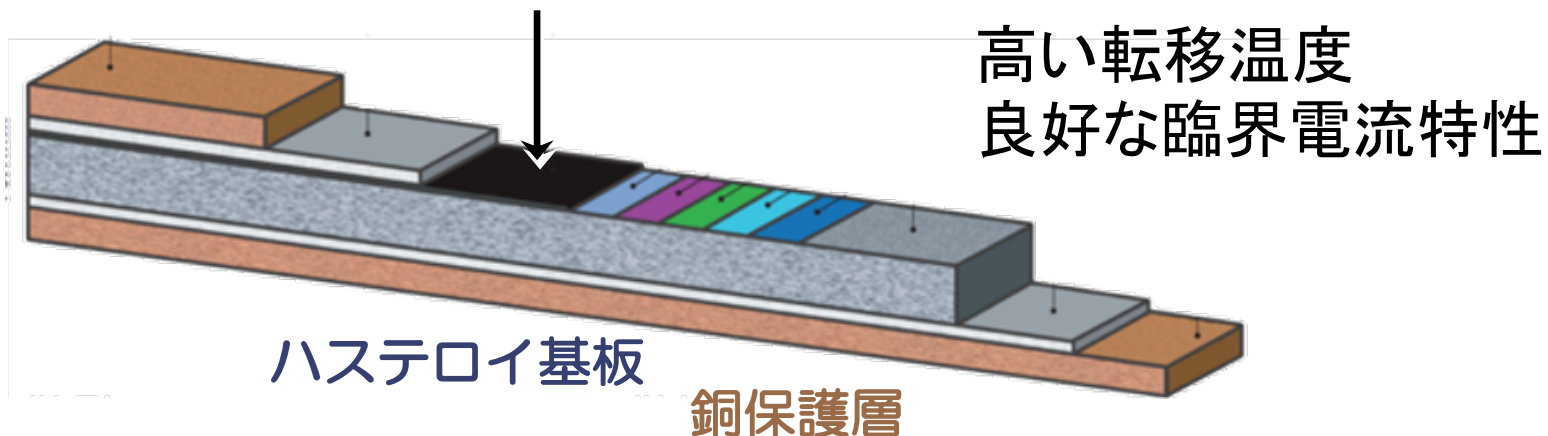
高温超電導線材

1

古河電工 佐々木宏和、山崎悟志、中崎竜介、北大 大沼正人

超電導線材：高磁場を発生させるための超電導コイル用途
送電線、MRI、リニアモーターカー、核融合炉...
金属系→高温酸化物超電導体

$(\text{Gd}, \text{Y})_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (GdYBCO)層



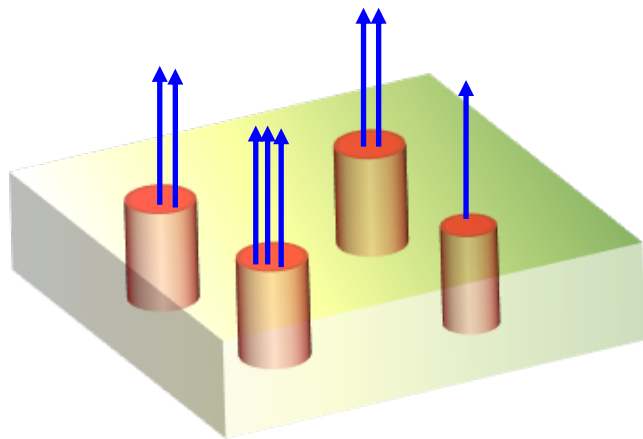
高温超電導線材中的人工ピン

コイル用途では、磁場により磁束量子が形成。
超電導体中で磁束量子が移動すると、熱を発生

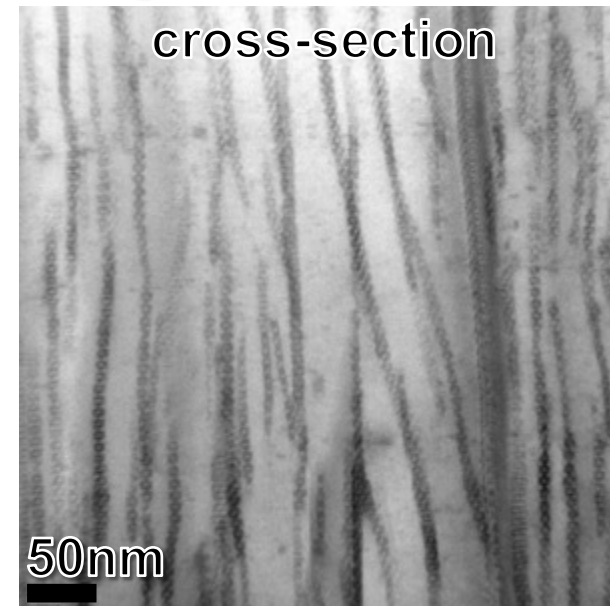
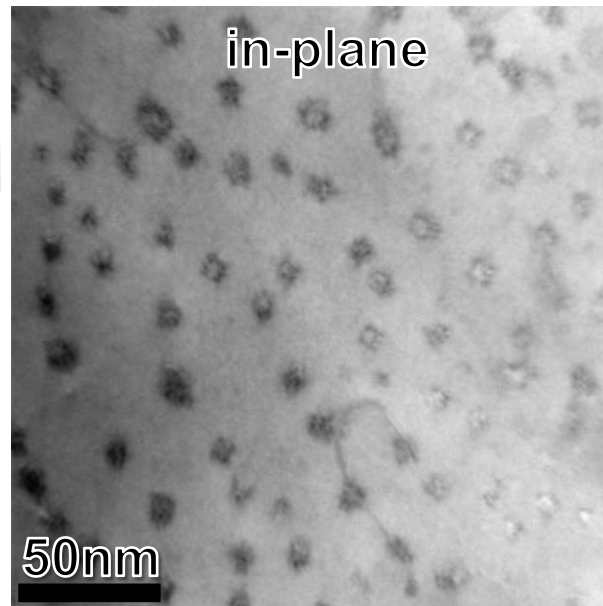


常電導体的人工ピンで磁束量子をピンング

GdYBCOではZr添加により
ロッド状の **BaZrO₃** 人工ピン



臨界電流密度・
臨界磁場が向上



小角散乱法による人工ピンの解析

BaZrO₃人工ピンの数、形態と超電導特性が密接に関係



小角散乱法でBaZrO₃人工ピンの定量評価

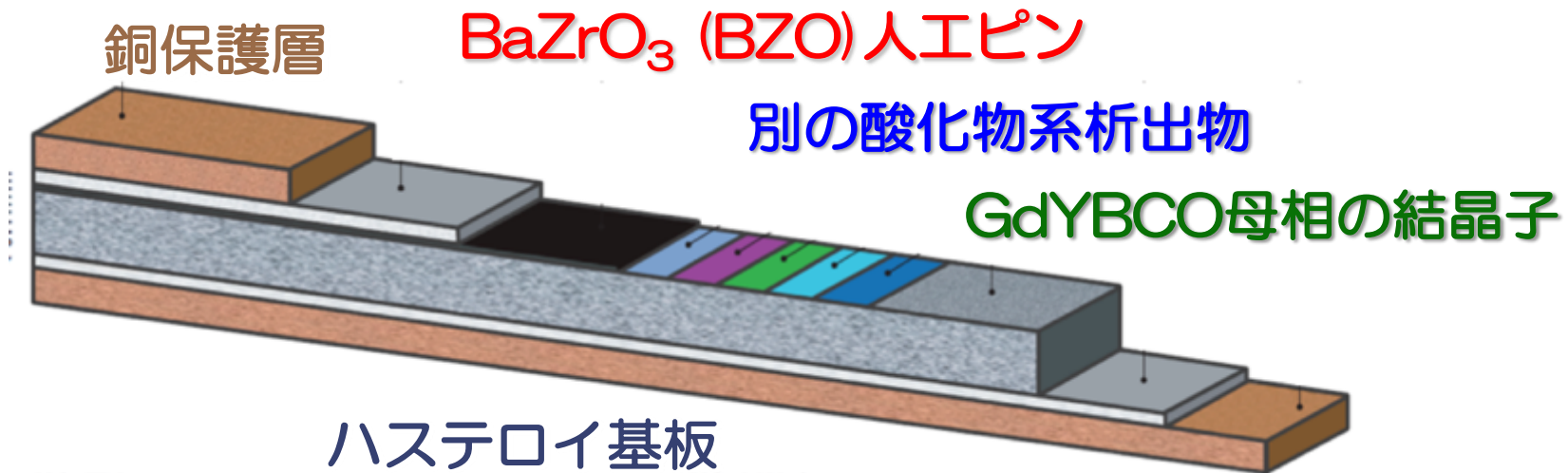
過去にYBCO, GdBCO中のAu人工ピンを評価した例
BL40B2でSAXS測定

T. Horide, K. Matsumoto, H. Adachi, D. Takahara, K. Osamura, A. Ichinose, M. Mukaida, Y. Yoshida, S. Horii, Physica C 445-448, (2006) 652.

T. Horide, K. Matsumoto, A. Ichinose, M. Mukaida, Y. Yoshida, S. Horii, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, (2007) 3729.

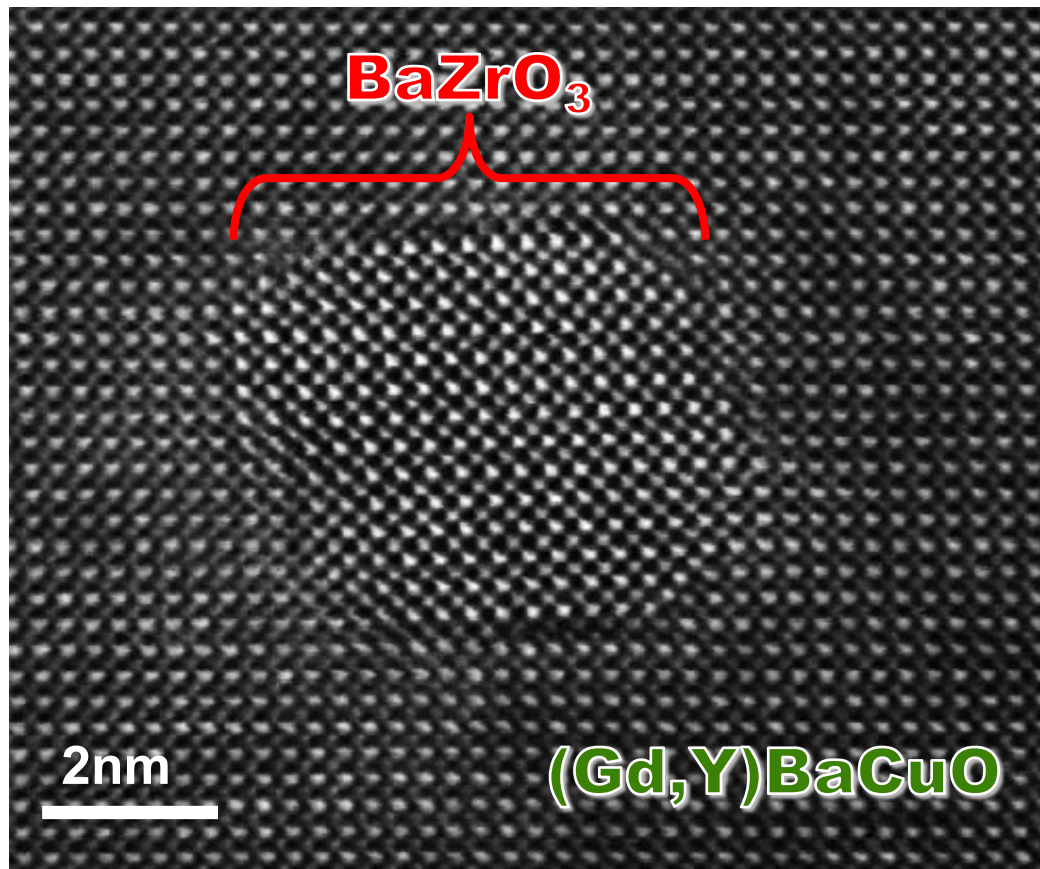
小角散乱法による人工ピンの解析

BaZrO₃人工ピン/GdYBCO母相へ小角散乱を適用



通常の小角散乱法では複雑なナノ構造
すべてを一度に観測してしまう

小角散乱法による人工ピンの解析



SANS

Gdが強い吸収

SAXS

GdYBCO母相と
 BaZrO_3 人工ピンは
散乱コントラストが小さい

異常SAXS (ASAXS)

BaZrO_3 / GdYBCO

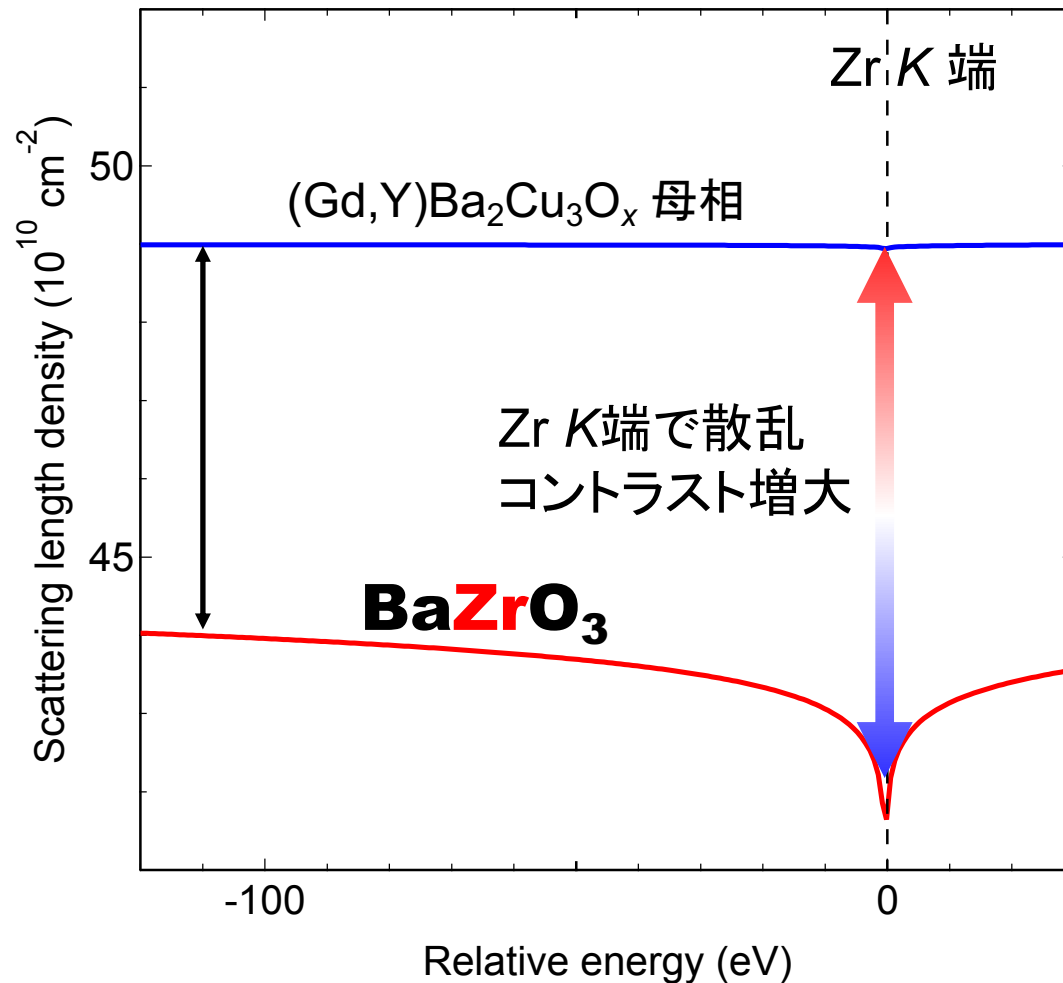
Zr K吸収端での異常散乱を利用して、Zrの散乱成分を測定

Zr K吸収端~18 keV

比較的高いエネルギー
Mo K α と同程度

ハステロイ基板も透過

散乱コントラスト（計算値）



ASAXS測定

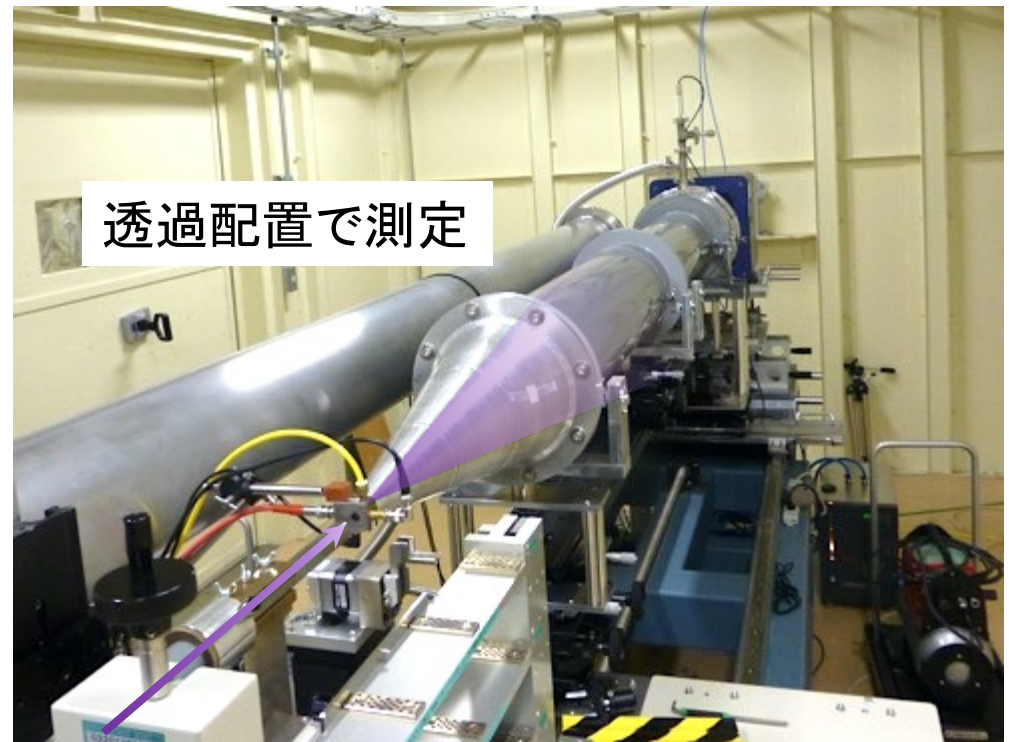
X線エネルギーを変化させてSAXS測定→放射光利用
エネルギーを変えてもX線が安定していることが重要

試料

Zr添加GdYBCO
(Zr=0-25 mol%)

ASAXS装置

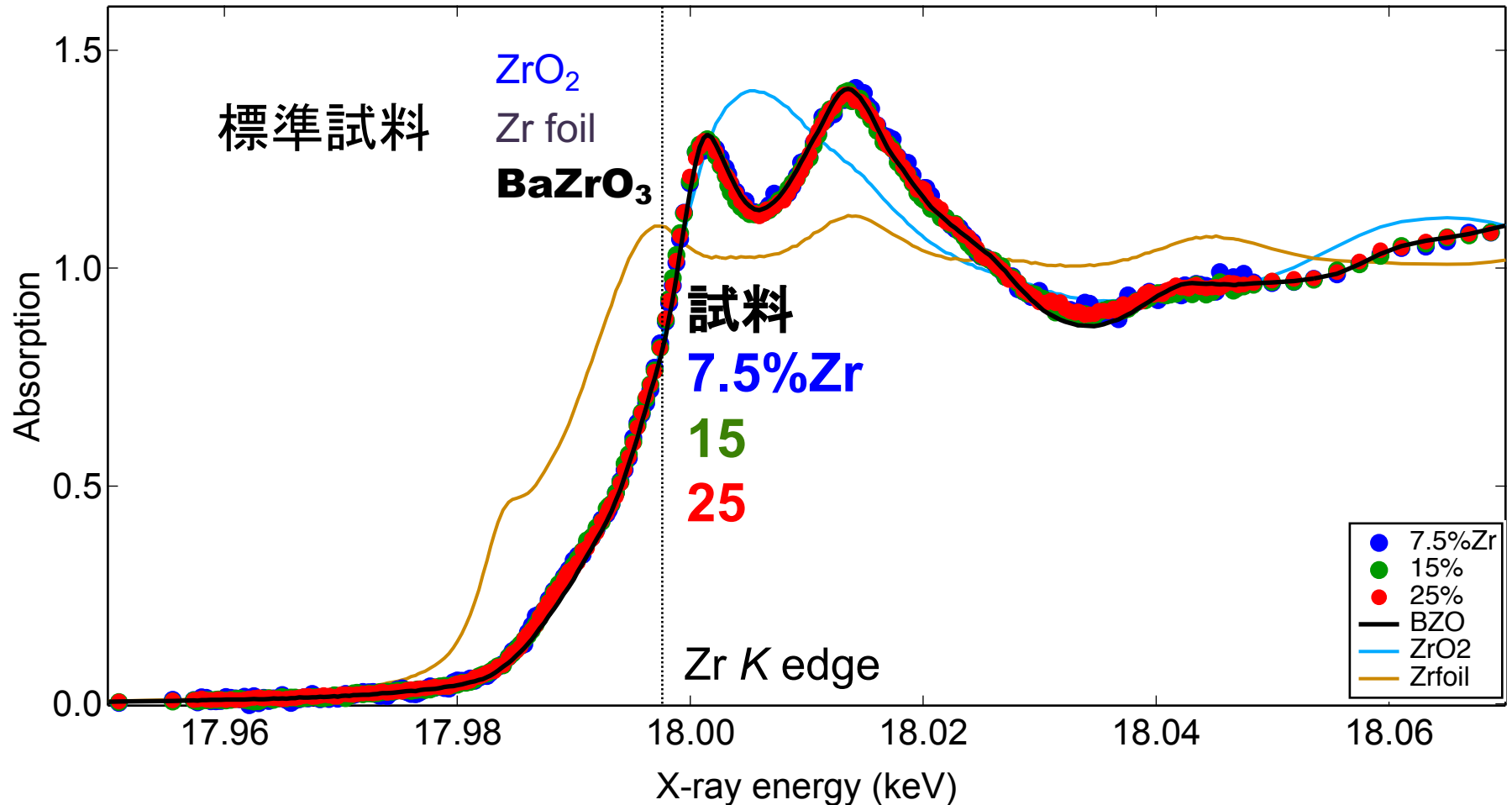
BL19B2@SPring-8



BL19B2はXAFS測定にも対応。エネルギーを変えやすい

ASAXS測定

調整のため、まずエネルギーを変えながら透過率測定

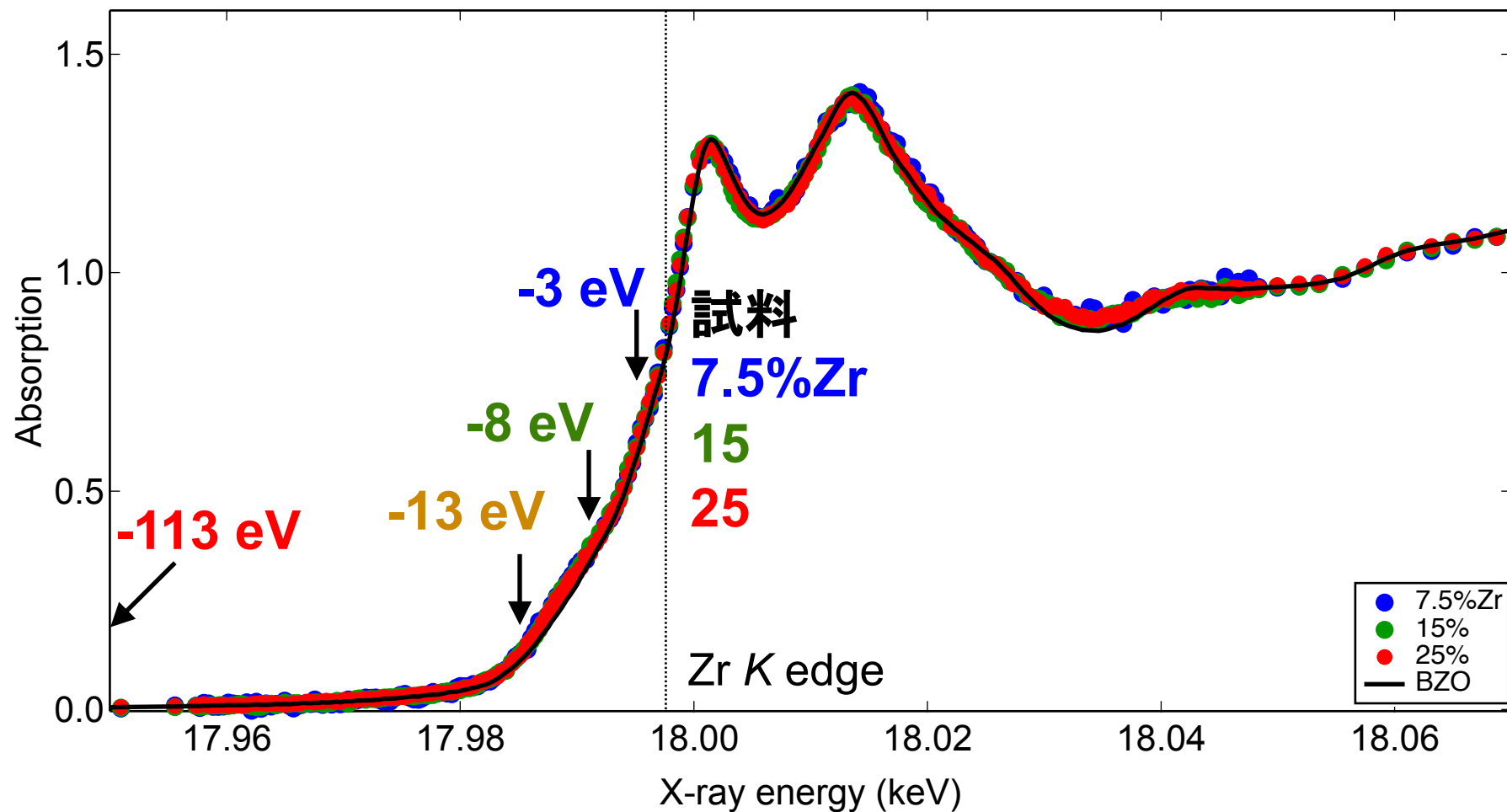


ASAXS測定ではXAFS(XANES)データも同時に得られる。

Zrはほぼ完全に BaZrO_3 。 ZrO_2 や金属Zrはない

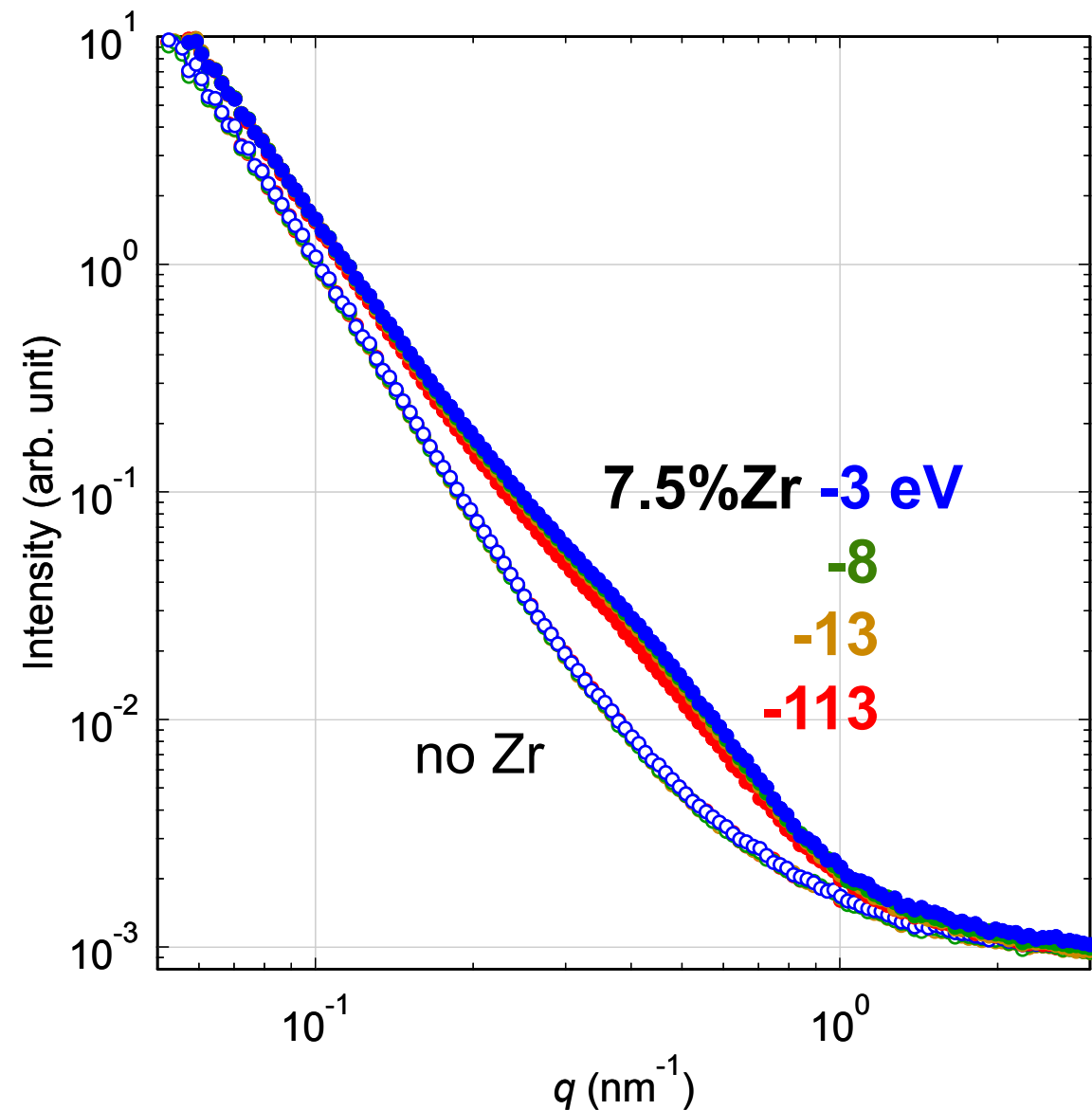
ASAXS測定

9



吸収端近傍の複数のエネルギーでSAXS測定

ASAXSプロファイル



Zrを含む試料
ではショルダー



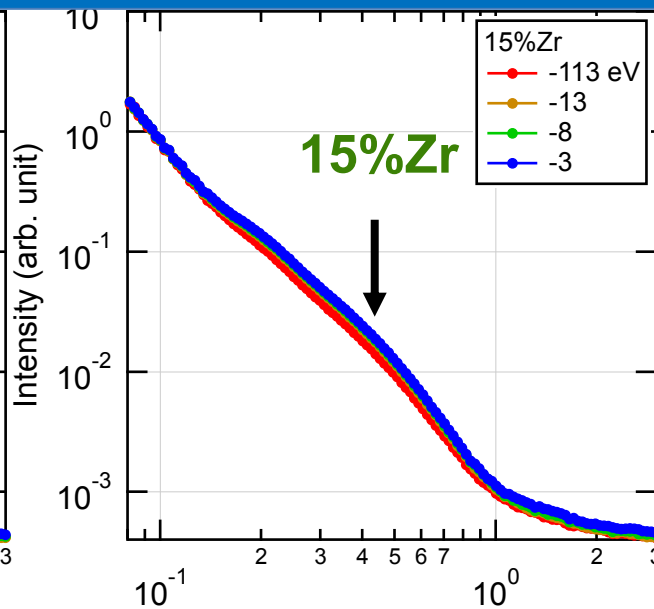
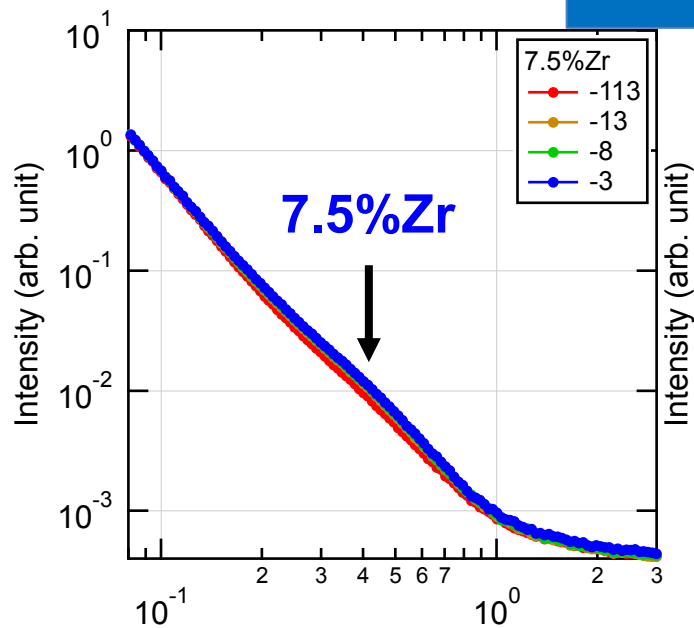
ナノ構造が形成

Zr K 端に近づく
とショルダーの強度が増大



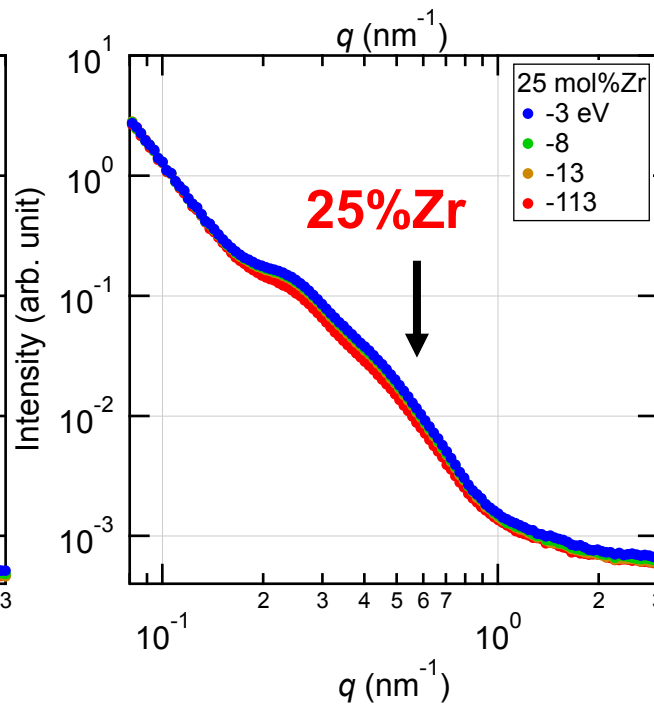
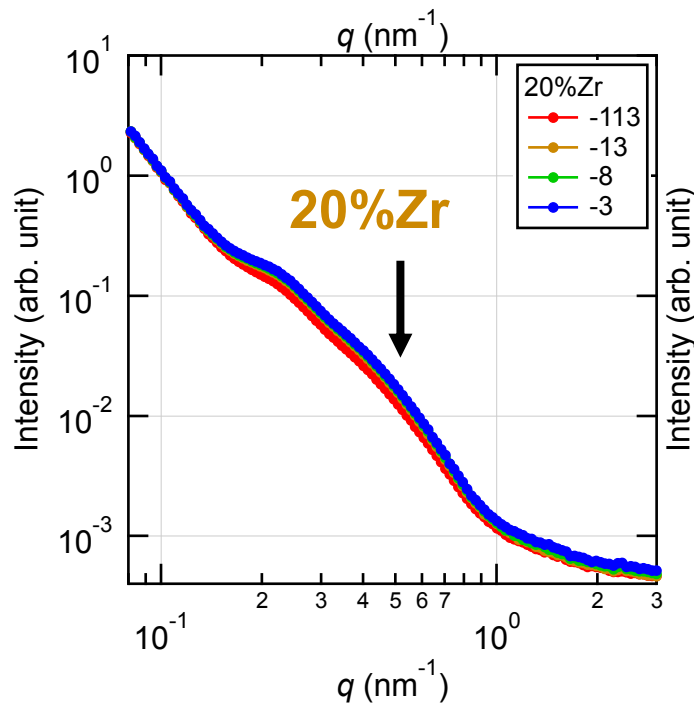
BaZrO₃

ASAXSプロファイル

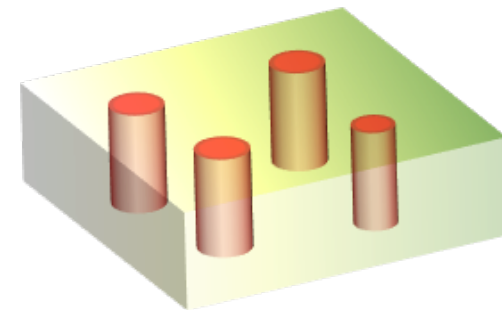


すべてのZr添加
試料でショルダー

Zr K 端に近づく
と強度増大



異常散乱成分の抽出

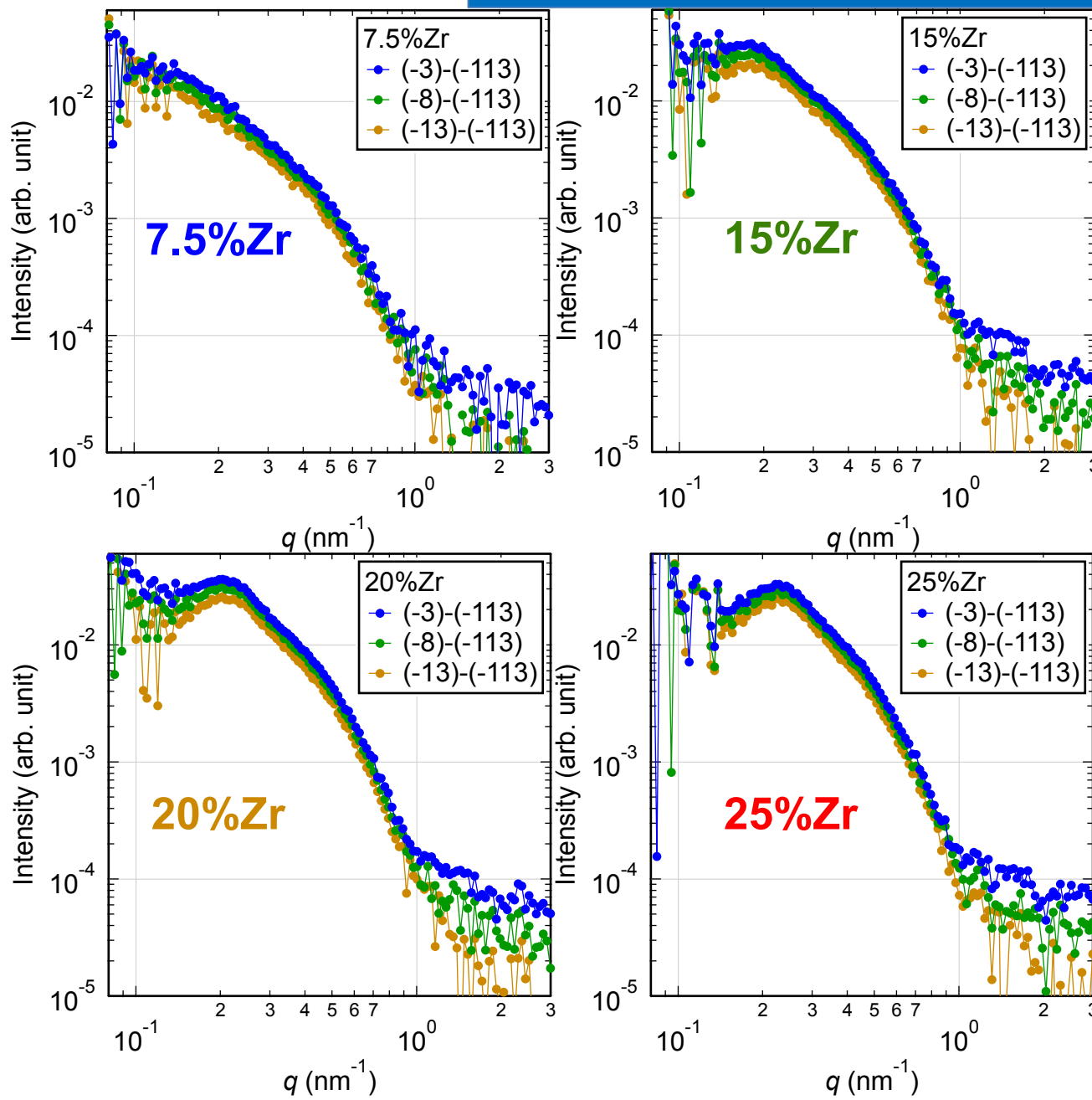


二相モデル

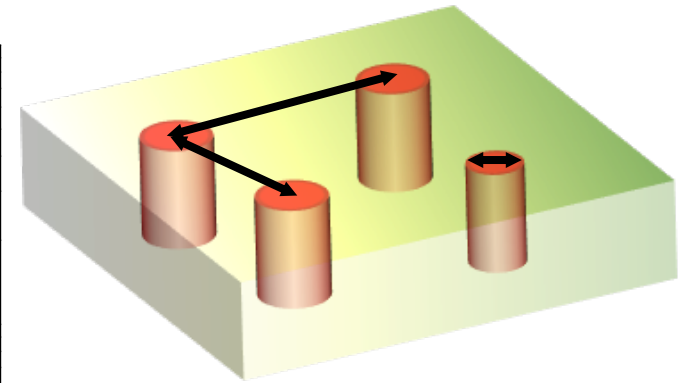
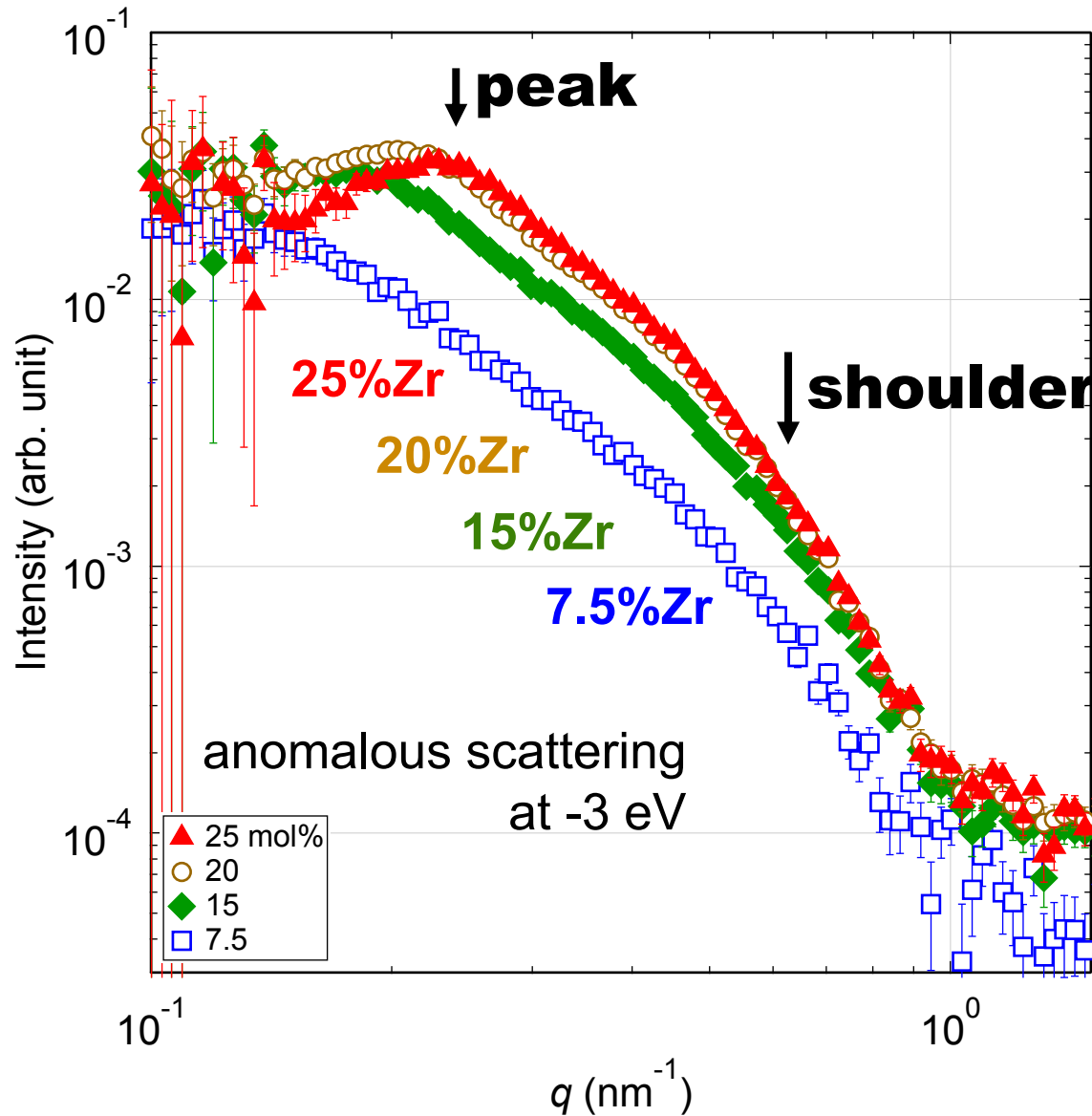
BaZrO_3
/ GdYBCO



Near edgeから
Far edgeを引き、
異常散乱成分(
Zrの散乱)を抽出



ナノ構造の解析



二相モデル

ショルダー

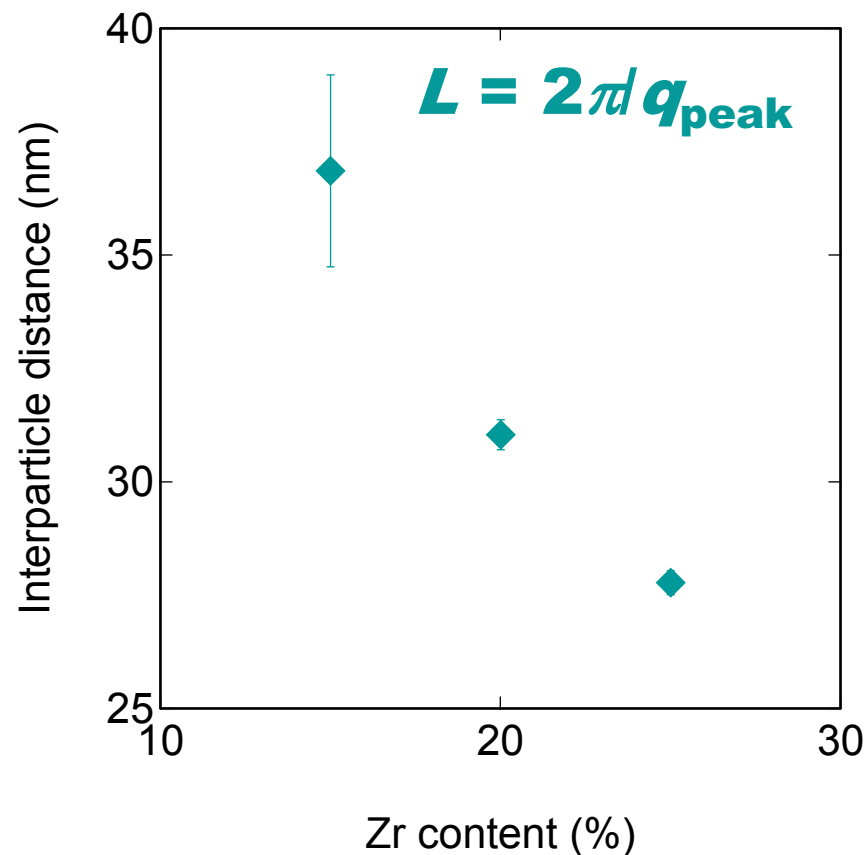
人工ピンのサイズ

ピーク

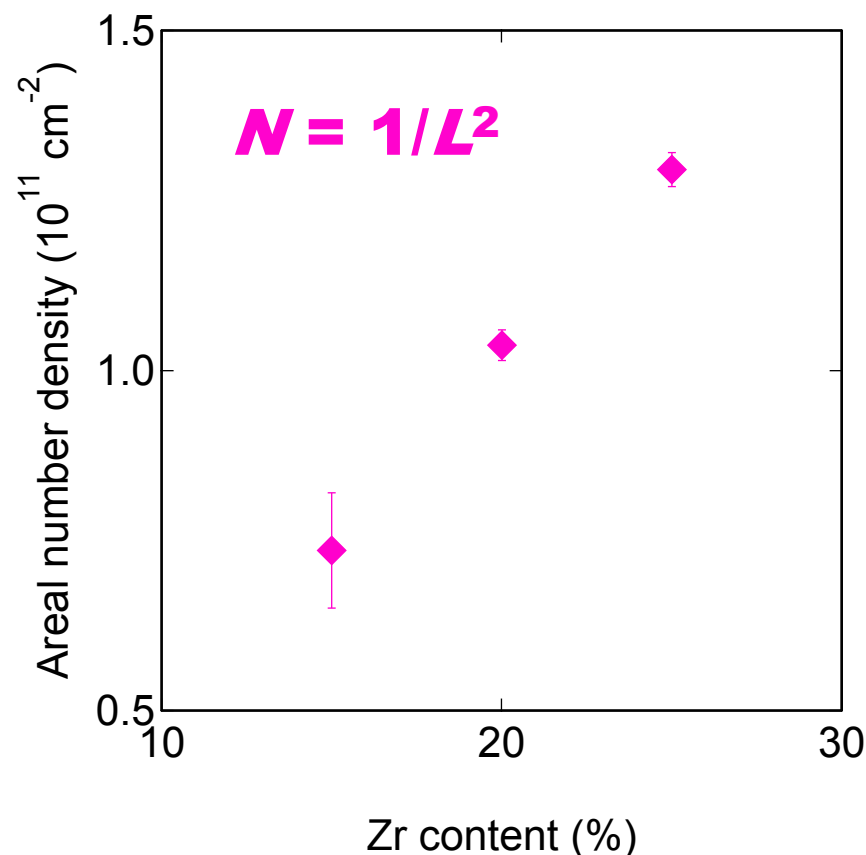
人工ピンの間隔

人工ピンの間隔

ピーク位置 \rightarrow 人工ピンの間隔 $L = 2\pi/q_{\text{peak}}$
= 人工ピンの面数密度 $N = 1/L^2$

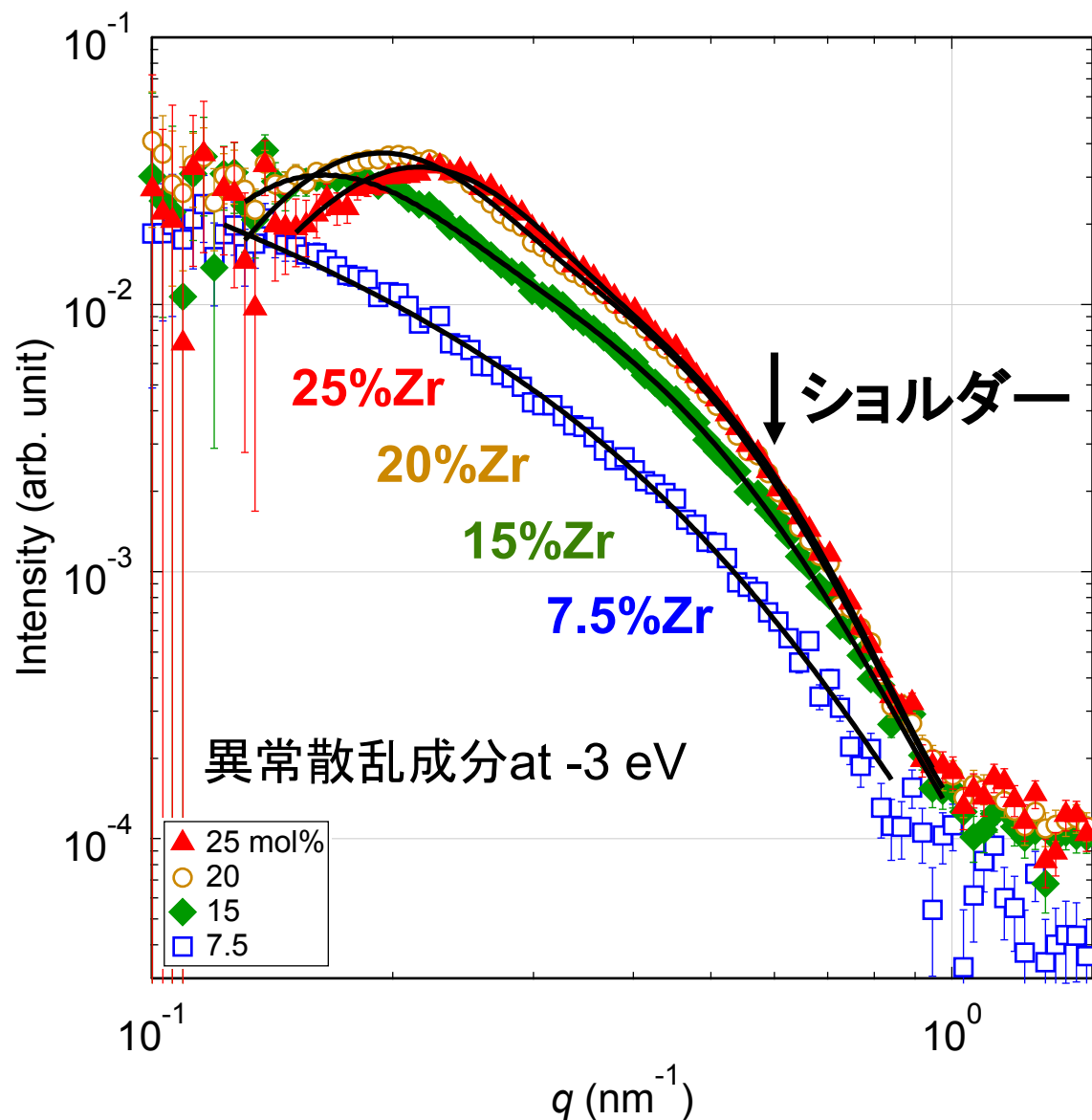


人工ピン間隔の減少



面密度の増加

カーブフィッティングによる平均粒径の解析



二相モデル

shoulder
curve fitting

$$I(q) \propto \int_0^{\infty} F^2 N V^2 S dr$$

F : form factor

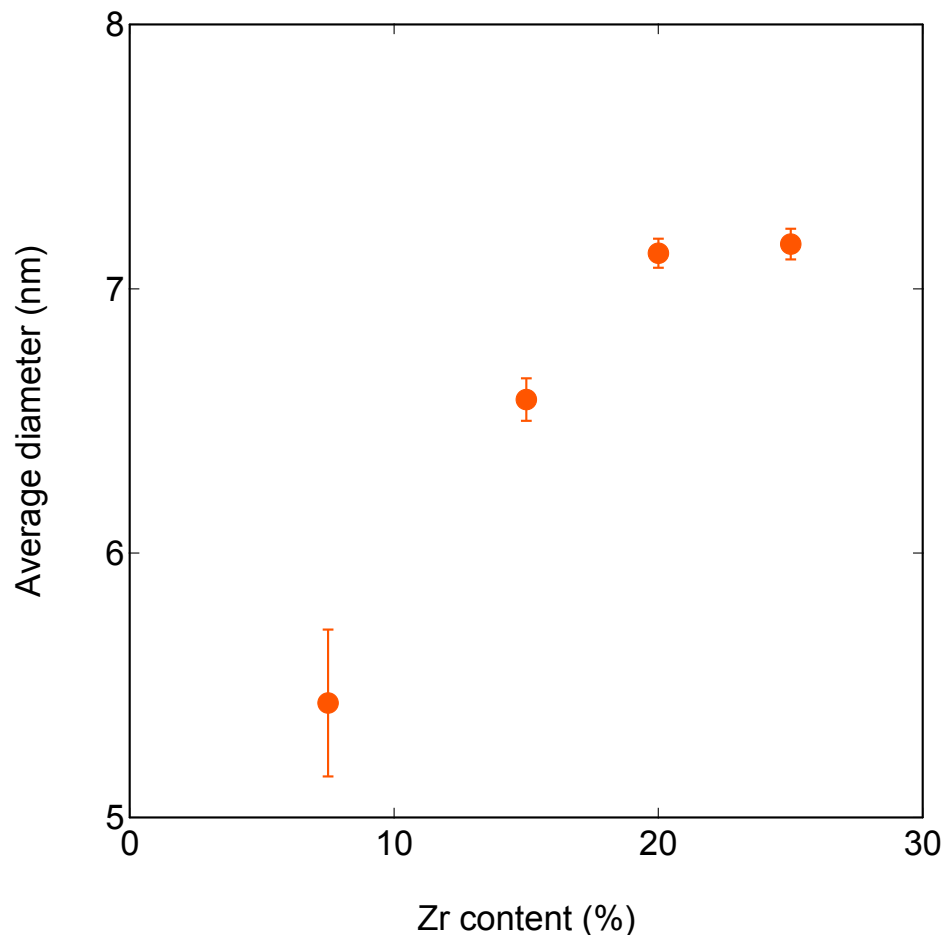
配向したロッド

N : size distribution

対数正規分布

V : volume

S : interference



平均粒径は20%まで増大
20%以上ではあまり変わ
らない

GdYBCO線材中のBaZrO₃人工ピンをASAXSで解析

人工ピンの間隔とサイズを定量的に評価できることを示した

提案: 金属材料を放射光SAXS測定する時は、基本的にASAXSを検討してみてもいいでしょうか？

SANS-Jの紹介

研究炉JRR-3に設置されたSANS装置

SANS-J

JRR-3

熱出力20 MW

波長 0.6 nm

q 領域: 0.003 –
4 nm⁻¹程度

装置担当者:

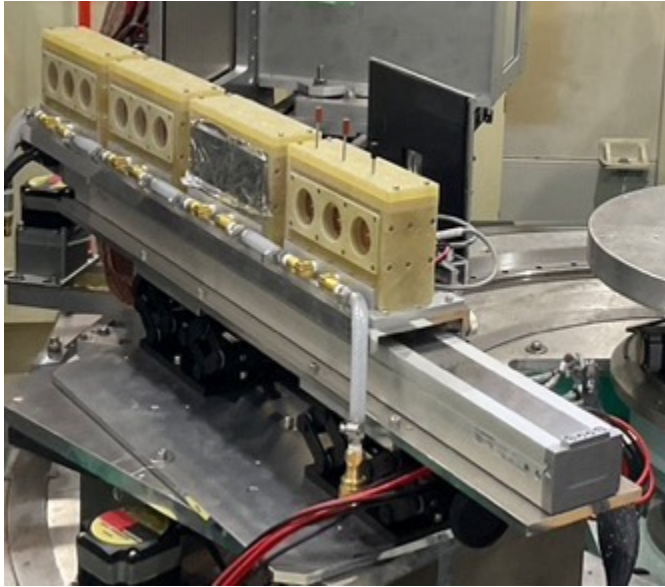
元川竜平(ソフトマター)

熊田高之(核スピン偏極)

中川洋(生命科学)

大場洋次郎(ハードマター)

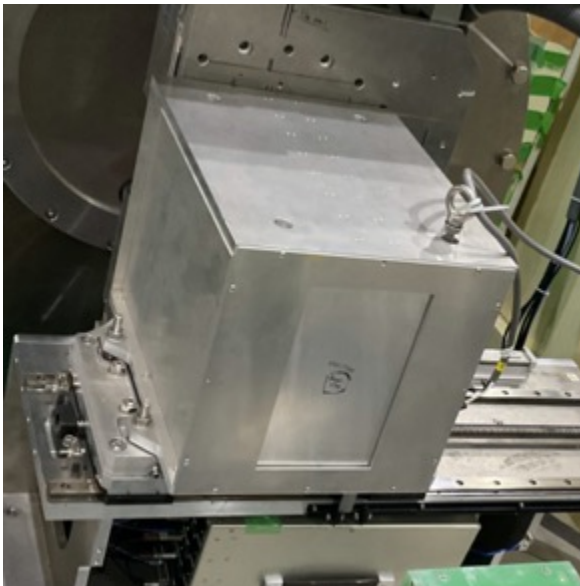
10年ぶりのJRR-3運転再開、ユーザー実験開始
SANSも利用し易い状況に



12連サンプルチェンジャー
& パルス温度調節器
(5-100°C)



1T電磁石 & 5連
サンプルチェンジャー

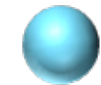


スピン偏極
アナライザー

SANSの特徴

ダメージが小さい(特に有機物、中性子)

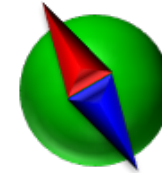
SANSでは水素等の軽元素を検出し易い
同位体を見分けられる
重水素の利用



H: -3.7 fm



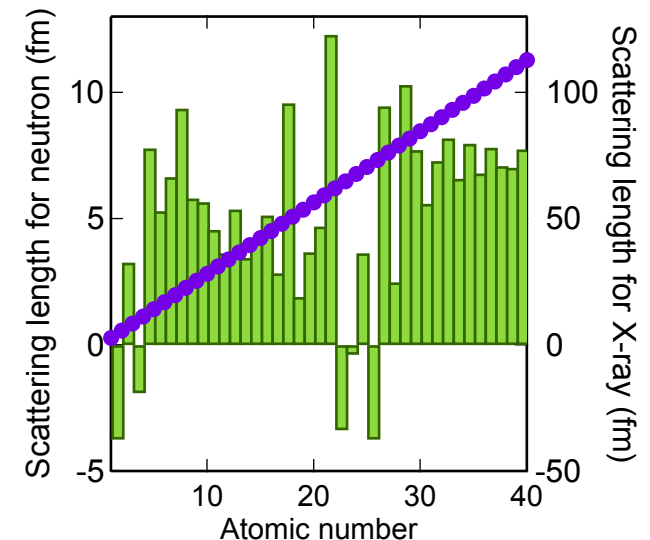
D: 6.7 fm



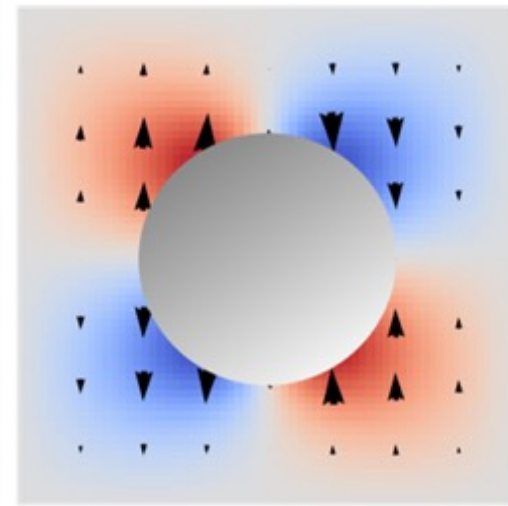
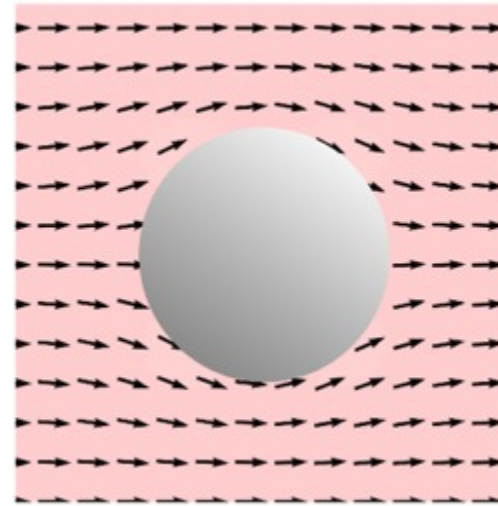
磁気散乱を観測できる(磁気構造解析)

散乱コントラストの違い

SAXS/SANSコントラスト比の解析
(合金コントラスト変調法)



磁場依存性のある散乱
→ スピンミスアライメント



1 T以上でもスピンミスアライメント→磁気異方性の増大
磁性材料にとって重要な磁気ナノ構造の情報

M. Bersweiler, E. P. Sinaga, I. Peral, N. Adachi, P. Bender, N.-J. Steinke, E. P. Gilbert, I. Peral, Y. Todaka, A. Michels, and Y. Oba, Phys. Rev. Mater. 5 (2021) 044409.

Y. Oba, M. Bersweiler, I. Titov, N. Adachi, Y. Todaka, E. P. Gilbert, N.-J. Steinke, K. L. Metlov, and A. Michels, Phys. Rev. Mater. 5 (2021) 084410.

SANS-Jのご利用をお考えでしたらお気軽にご相談ください

JRR-3 ユーザーズオフィス <https://jrr3uo.jaea.go.jp>

大場 洋次郎 ohba.yojiro@jaea.go.jp