

令和元年6月18日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04210

研究課題名(和文)非晶質中距離秩序構造の起源：化学的短距離秩序構造とバーナル空隙のハーモニー

研究課題名(英文)The Medium Range Ordering of Amorphous Alloys: Chemical Short Range Ordering and Bernal Polyhedra

研究代表者

杉山 和正 (Sugiyama, Kazumasa)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：40196762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、AXS-RMC法を駆使して回折プロファイルにプレピークを示す非晶質合金の中距離領域構造を評価した。従来プレピークの起源とされてきた正二十面体クラスター構造(TSRO)や結合性の強いSolute-centerモデル(CSRO)といった明瞭な短距離秩序構造は、プレピークの必須要素ではないことを明らかとした。そして、新規に開発したCA-Bernal解析によって、プレピークの正体は、結合性の強いBernal型高密度領域構造CMROや組成および密度の不均一性を内在する非Bernal型低密度領域構造TMROによって形成される中距離領域構造であることを明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非晶質合金中の中距離領域構造はガラス形成能や機械的特性などの巨視的な材料特性に影響をおよぼす重要な要素であると議論されているが、その詳細は金属分野における未解決問題の1つとなっていた。本研究は、回折プロファイルにプレピークをもつ非晶質合金を研究対象に、研究グループ独自のAXS-RMC法とCA-Bernal解析を駆使して、中距離領域構造の詳細を解明した。溶質元素と溶媒元素の強い結合性に起因する充填密度の大きなBernal型CMROと溶媒元素の希薄な充填密度の低い非Bernal型TMROの協奏は、ランダム系物質の構造を理解するための学術的なブレイクスルーとなると確信している。

研究成果の概要(英文)：In this study, we used the advanced AXS-RMC method to evaluate the medium-range ordering structure of an amorphous alloy that shows a pre-peak signal in the diffraction profile. It was clarified that the clear short-range ordering structures such as icosahedral cluster (TSRO) and/or the strongly binding solute-center model (CSRO), which have been regarded as the origin of pre-peaks in the past, are not essential elements for the appearance of pre-peak signals. And, according to the newly developed CA-Bernal analysis, the identity of pre-peak signal is suggested to be formed by the harmony of the strongly binding Bernal-typed high density domain structure (CMRO) and the non-Bernal-typed low density domain structure (TMRO) inherent in composition and density non-uniformity.

研究分野：金属物理化学

キーワード：amorphous metal short range ordering middle range ordering anomalous scattering reverse Monte Carlo radial distribution

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子のランダム配列を特徴とする非晶質合金は、磁氣的性質および機械的強度などに優れた材料特性を示すものが多く、工学的応用が期待されている。非晶質合金の構造解析の基本は、回折法によって得られた動径分布関数から、対象試料に存在する短距離秩序構造(Short Range Ordering: SRO)を決定し、さらにその連結様式(中距離秩序構造(Medium Range Ordering: MRO))を議論することにある。しかし対象となる合金が複雑な化学組成を持つ場合、通常の実験で得られた一次元構造情報から SRO を特定することは困難であり、さらに MRO を議論することは事実上不可能に近い。この構造的議論に関する制約は、非晶質合金の物性に対する理解と効率的な材料開発の大きな支障となっている。本研究のキーワードとなるプレピークとは、メインピークの低角側に観察される回折ピークのことであり、非晶質合金の MRO の存在を示す実験事実として注目を集めている(図1)。これまでの研究では、特定元素周囲に化学的短距離秩序構造(CSRO)が存在する場合、CSRO が規則的に連結することにより MRO が発達しその結果プレピークが出現すると定性的に理解されてきた。しかし一般に、プレピークが観測される合金は多成分系であることに起因して、CSRO の詳細はもちろん MRO の具体的なイメージとその形成機構に関する研究は未踏領域にある。最近では、プレピークを持つ非晶質合金の特殊構造を説明する構造モデルとして、古典的な剛体球無秩序充填(Dense Random Packing of Hard Spheres: DRPHS)モデルを発展させた Solute-Center モデルが提案されているが、その妥当性は確認されていない。

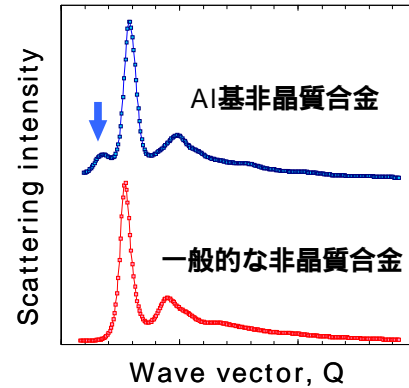


図1. プレピークをもつ非晶質合金と一般的な非晶質合金の回折パターンと比較

本研究グループは、これまで X 線異常散乱法 (Anomalous X-ray Scattering : AXS) による環境構造解析と reverse Monte Carlo シミュレーション (RMC) をドッキングした AXS-RMC 法の開発研究に従事し、特に Zr 基非晶質合金の CSRO に関して決定的な実験結果を報告してきた。そしてその研究過程で、明瞭なプレピークを示す ZrPt 非晶質合金について以下のような構造的な特徴を発見している。(1) 0.5 から 0.6 nm の Pt-Pt 中距離領域相関がプレピークの発現に関与している。(2) 従来から提唱されてきた Pt 中心正二十面体型 CSRO の存在頻度はそれほど高くはない。この実験事実は、ZrPt 非晶質合金のプレピークを Pt 中心正二十面体型 CSRO の連結に伴う MRO の発達という従来型のストーリーで理解することができないことを示唆している。本研究グループは、このような実験事実を踏まえプレピーク発現機構の理解には CSRO の連結という基本モデルを根本的に修正する必要があると考え本研究課題の着想に至った。さらに、我々が着目するプレピークは、 $Al_{50-70}Zr_xTM_y$ (TM=Cu, Ni) および $Al_{50-70}Mn_xMT_y$ (MT=Si, Ge) など Al 基 3 元系非晶質合金に観察できることを考慮すると、プレピークの起源の完全解明には、放射光を積極的に応用した AXS-RMC 法の利用が不可欠であると考えた。

2. 研究の目的

本研究の主眼は、放射光を駆使した X 線異常散乱法 AXS-RMC 法を駆使して、回折強度プロファイルにプレピークが観察できる非晶質合金の精密構造解析を実施し、合金中の CSRO の確定そして MRO の形成機構を 3 次元定量的に解明することにある。そして最終目標として、特定の CSRO が卓越しているがプレピークが観察できない非晶質合金の構造解析結果と比較検討することによって、非晶質合金一般に通用可能な MRO の形成機構の解明を目指すこととした。もうひとつの本研究の独創点は、得られた構造モデルの定量的評価のために、CSRO の詳細を解明できる Voronoi 解析(VA)および MRO の統計的処理を実施できる Common Neighbor 解析(CNA)を応用する点にある。申請者は、この独創的な試みが非晶質合金における CSRO の詳細と MRO の形成に関する議論を格段に進展させることができる唯一の手段であると期待しているが、同時に合金試料の作製から独創的な構造解析までをバランスよく実施することが可能な技術レベルにあるのは国内外を問わず本研究グループのみであると自負している。

3. 研究の方法

研究推進のキーポイントは、(1)たとえ隣り合う原子番号の元素が共存する場合でも的確に目的元素の構造情報が解析できる AXS-RMC 法を駆使した非晶質合金 CSRO の特定、(2)CN 解析および本研究グループが独自に開発した BP 解析を用いた MRO の形成メカニズムの解明、(3)MRO の存在が明らかな Zr 基および Al 基非晶質合金を研究対象試料として選択の 3 点にある。X 線異常散乱法(AXS 法)は、放射光実験施設で実施する、図 2 に X 線異常散乱法の概略図を示す。とくに解析対象が非晶質ランダム系の場合、通常平均動径分布関数の情報だけでは、系内に存在する原子相関ペアを分離解析することができない。しかし、例えば構成元素の共鳴散乱を利用した環境構造解析をおこなえば、目的元素周囲の構造情報が得られ、例えば Zr-Pt 系非晶質合金の構造解析では、中距離相関を持つ Pt-Pt 原子相関の情報を議論することができる。そして、リバ

ースモンテカルロ(RMC)法は、得られた動径分布関数の情報から 3 次元原子配列モデルを抽出するシミュレーション手法である。上記 2 つの方法論のドッキング(AXS-RMC 法)によってはじめて非晶質金属内に発達する中距離領域構造の評価が可能となる。非晶質合金試料は、単ロール液体急冷法を用いて作製する。本研究で研究対象とする MRO が発達している Zr 基および Al 基非晶質合金はガラス形成能が低く、試料組成の不均質や結晶相の析出などの問題を生じやすかったを傾角鋳造アーク炉によって母合金を作製しプレピークの存在が明らかとなっている Zr 基及び Al 基合金を作製した。同時にプレピークを示さないが、ガラス形成範囲が狭く中距離領域構造の存在が予想される系やガラス系性能が高い合金系の作製も行い、本研究で得られた中距離領域構造の起源に関する議論を深めた。

4. 研究成果

(1) Zr₈₀Pt₂₀ 非晶質合金の構造解析

剛体球最密充填(Dense Random Packing: DRP)構造を初期モデルとして RMC-simulation を実施し、Zr および Pt 元素を対象とする AXS 測定結果を再現する非晶質構造モデルを作成した RMC および DRP モデルの計算値および AXS 測定から得られた平均干渉関数および環境干渉関数を図 3 に示す。中距離秩序構造の根拠として知られているプレピークも含めて、実験値は十分に再現されており、得られた RMC モデルを解析することによって中距離領域構造の詳細が議論できる。プレピークシグナルが、平均干渉関数および Pt 周囲の環境関数に観察されることより、中距離領域構造は、0.45 nm の Pt-Pt 相関が基盤とすることが判明したので、その原子間ペアに関する構造の詳細を検討した。CNA(Common Neighbor 解析)の結果、図 4 に示す Pt-Pt 相関は、主として Pt-Zr 間の小さな混合エンタルピーに担保される Pt-Zr₃-Pt 連結と深く関連することが判明した。さらにこの特異な連結は、準結晶の構造単位である Mackay 多面体にも観察され、本非晶質相の熱処理によって準結晶が晶出することとも深く関連する。これまで非晶質構造に存在する最近接領域構造(局所構造)は、CSRO と TSRO に大別されることを鑑みて、本研究は、Pt-Zr₃-Pt 連結を基盤とする CMRO(Chemical Middle Range Ordering)に付随する TMRO(Topological Middle Range Ordering)に関する解明を進めた。非晶質の構造モデルに汎用される前述の DRP モデルは、密度の高い局所構造単位の連結によって形成され、Bernal 多面体に代表される高密度 TSRO を特徴とすることを参考に、本研究では新たに非 Bernal 多面体という概念を導入した。本系 Zr-Pt 合金で観察できるユニークな中距離相関は、図 4(c)に分類でき、その周囲には、DRP モデル構造に普遍的な Bernal 型の多面体はあまり存在せず、平均組成よりは Pt に富む非 Bernal 型の多面体が発達していることがわかった(図 5)。すなわち、ZrPt 非晶質合金中に観察される Pt-Pt 中距離相関の規則化は、(1) Bernal 四面体連結を主とする Zr に富む高密度領域および(2) 非 Bernal 多面体を主とする Pt に富む低密度領域によって生じることが判明した。これらの結果は、非晶質金属における MRO が化学的秩序構造と幾何学的秩序構造の組み合わせにより生じていることを強く示唆していると考えている。

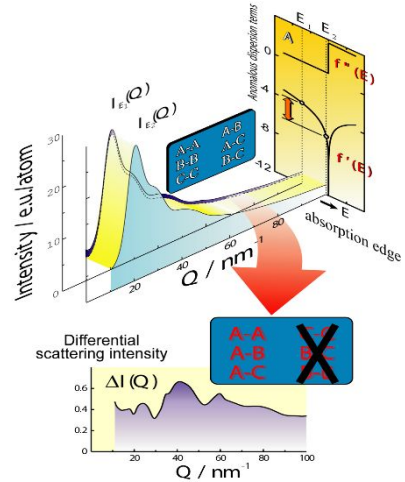


図 2. X線異常散乱法の原理

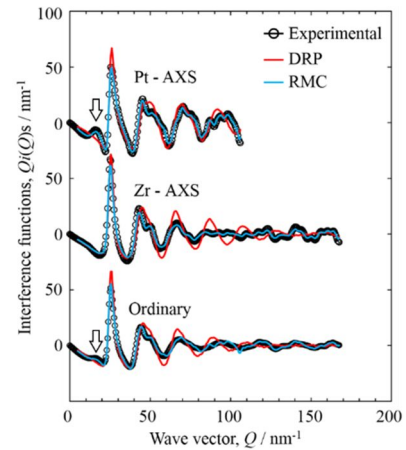


図 3. Zr₈₀Pt₂₀ 非晶質合金の干渉関数

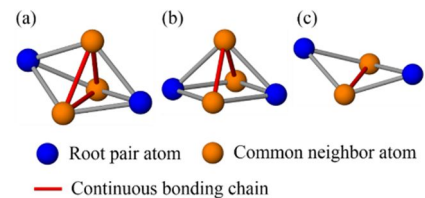


図 4. 中距離領域構造の起源 Pt-Zr_x-Pt 連結

	Number	Fraction [%]	r [nm]	Occupancy [%]			
				Common neighbors		SBCs	
				Zr	Pt	Zr	Pt
FSTT	2436 (2784)	38.2 (49.0)	0.534 (0.538)	95.7 (85.7)	4.3 (14.3)	83.5 (77.7)	16.5 (22.3)
CHO	2330 (2592)	36.5 (45.6)	0.509 (0.520)	90.8 (85.3)	9.2 (14.7)	81.8 (84.0)	18.2 (16.0)
PTD	331 (136)	5.2 (2.4)	0.470 (0.478)	86.7 (85.3)	13.3 (14.7)	77.2 (84.9)	22.8 (15.1)
PTTP	166 (72)	2.6 (1.3)	0.461 (0.465)	89.2 (90.3)	10.8 (9.7)	77.1 (88.1)	22.9 (11.9)
PBAT	119 (19)	1.9 (0.3)	0.462 (0.467)	87.4 (81.6)	12.6 (18.4)	71.8 (85.5)	28.2 (14.5)
Bernal polyhedra	5382 (5603)	84.4 (98.6)	0.513 (0.527)	92.7 (85.5)	7.3 (14.5)	81.6 (81.4)	18.4 (18.6)
Non Bernal polyhedra	997 (82)	15.6 (1.4)	0.438 (0.510)	82.7 (84.8)	17.3 (15.2)	74.9 (81.7)	25.1 (18.3)

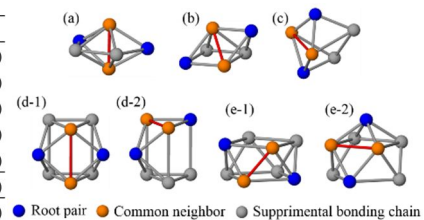


図 5. 溶媒元素 Zr に富む領域と溶質元素 Pt に富む領域が複合した非 Bernal 型中距離領域構造がプレピークの起源である。

(2) $Zr_{70}Pt_{20}Ni_{10}$ 非晶質合金の構造解析

Pt および Ni の構成元素 2 種類に関して AXS 測定をおこなった。Zr-Pt 系と同様に $Q = 18 \text{ nm}^{-1}$ 近傍にプレピークが明瞭に観察できた。Zr, Pt および Ni 周囲の AXS 測定から環境構造干渉関数を導出し, AXS-RMC 解析を実施した (図 6)。Zr-Pt 非晶質合金の場合と同様に, DRP モデルでは再現できなかったプレピークシグナルや振幅挙動の詳細が, 本解析で得られた RMC モデルでは十分に再現できている。そして, プレピークシグナルが Pt-Pt 部分相関において顕著に観測されることから, 本系にも Pt-Pt 中距離領域構造が発達していることが判明した。さらに関連する部分二体分布関数には, 距離 0.4 - 0.5 nm の Pt-Pt 相関の存在が明瞭であったことも付記しておく。本研究では, CAN 解析することによって Pt-Pt 中距離異常構造の詳細を解明した。結果, プレピークシグナルの原因は, CAN インデックス [333] および [211] で示される Pt-Pt 連結であることが判明した。[333] の連結は, Pt-Pt 相関の低距離化と異種元素結合に特徴があり, Zr-Pt 系の場合と同様に Pt-Zr3-Pt 結合が支配的である。一方, [211] の場合は, [333] に観測された化学的秩序は明瞭でない。この事実は, Zr-Pt-Ni 系非晶質合金のプレピークの起源は, CMRO がメインの [333] 相関そしてどちらかという TMRO がメインの [211] 相関の 2 種類のメカニズムが働いていると理解できる。実際, 0.4 - 0.5 nm 領域の [211] 相関には, 非 Bernal 多面体のひとつであるキャップド半八面体 (CHO) が卓越している。Zr₇₀Pt₂₀Ni₁₀ においては Zr₈₀Pt₂₀ の場合とは異なり低密度 TMRO という幾何学的なパッキング様式の形成は認められなかったが, 短距離化した Pt-Pt 相関内に Zr-rich な領域を持つ四面体連結構造や CHO 型をともなう TMRO の増加がプレピークの起源であることが明らかとなった。

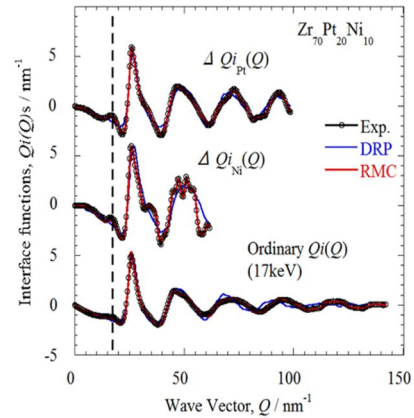


図 6. $Zr_{70}Pt_{20}Ni_{10}$ 非晶質合金の干渉関数

(3) $Al_{80}Ni_{15}Zr_5$ 非晶質合金の構造解析

Al を主成分とする 3 元系非晶質合金にも, X 線回折プロファイルにおいて明瞭なプレピークを示すものがあり, 本系に関しても同様な AXS-RMC 解析を行った (図 7)。Zr および Ni-AXS 測定において, Pt-AXS の測定データにおいて, $Q = 16 \text{ nm}^{-1}$ 近傍にプレピークが明瞭に観察された。同様に AXS-RMC 解析を行った。本試料は Zr の含有量が少ないため, Zr 周囲の環境構造解析には若干の改善余地がある。しかし, 今回の解析の範囲では, Ni-Ni 相関および Al-Ni 相関に対応する部分構造因子でプレピークシグナルはおおむね説明可能であった。さらに CAN 解析によって, Ni-Ni および Ni-Al 中距離領域構造は, Ni-Zr₂-Ni および Ni-Zr₂-Al 結合が支配的であり, Bernal 型高密度 TMRO と Al-poor な非 Bernal 型低密度領域の形成と密接に関連していることが判明した。

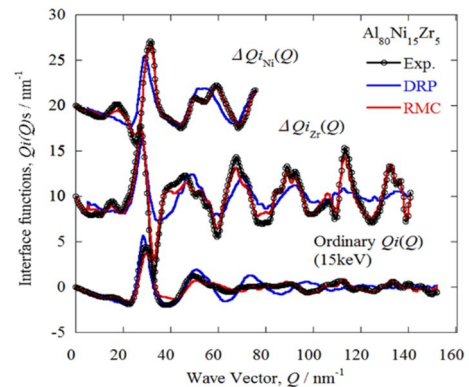


図 7. $Al_{80}Ni_{15}Zr_5$ 非晶質合金の干渉関数

(4) $Al_{60}Ge_{30}Mn_{10}$ 非晶質合金の構造解析

$Al_{60}Ge_{30}Mn_{10}$ 合金は, 中距離化学的秩序構造が発達すると考えられる合金系で観測されるプレピークに加えメインピークの低 Q 側にはショルダーピークも観測できる。Ge および Mn-AXS 実験の結果には, $Q = 18 \text{ nm}^{-1}$ 近傍にプレピークがそして 23 nm^{-1} 近傍にショルダーピークが明瞭に観察される (図 8)。AXS-RMC 法で解析した部分構造因子から, プレピークは Ge-Ge, Mn-Mn, Mn-Al 中距離領域相関と関連し, ショルダーピークは, 主として Ge-Ge 相関に関連することが判明した。関連する二体分布関数の解析から, プレピークは, 距離 0.4 - 0.5 nm にみられる Ge-Ge, Mn-Mn および Al-Mn 原子相関に関連し, 一方ショルダーピークは, 距離 0.35 - 0.45 nm の領域の Ge-Ge 原子相関に対応している。一例として Mn-Mn の中距離相関の詳細を説明する。Mn-Mn 中距離相関に対する CNA 解析の結果より, これまでと同様に Ge-X₂-Ge (X=Al, Ge, Mn) [211] が基本連結メカニズムと結論できたが, 特徴的な化学的秩序構造は観測できなかった。さらに [211] 連結周囲の幾何学的特長を Bernal 多面体および非 Bernal 多面体を用いて

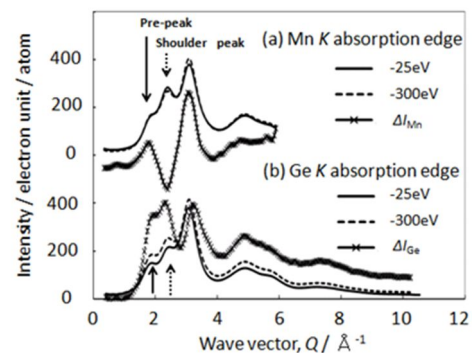


図 8. $Al_{60}Ge_{30}Mn_{10}$ 非晶質合金の AXS 実験

精査したところ、関連する非 Bernal 多面体に溶媒元素が希薄になっている領域構造の発達を確認できた。同様な解析によって、プレピーク関連する[211]結合に関しては、Mn-Mn, Mn-Al, Mn-Ge および Ge-Ge いずれの連結に関しても、ルートペアと強固な化学結合を予想させる Bernal 型高密度領域と溶媒が希薄な非 Bernal 型低密度領域の形成が認められた。すなわち、 $\text{Al}_{60}\text{Ge}_{30}\text{Mn}_{10}$ 非晶質合金のプレピークの起源は、距離 0.35 - 0.45 nm の溶質元素の第 2 近接相関と強い関係があり、その周囲には溶質元素と溶媒元素の強い結合を示す Bernal 型高密度 CMRO と比較的溶媒元素の希薄な非 Bernal 型低密度 TMRO の協奏にあると考えることができる。

(5) $\text{Zr}_{70}\text{Co}_{30}$ 非晶質合金の構造解析

Zr-Co 二元系状態図は Zr-Ni 二元系に類似した共晶型を示し非晶質相の形成範囲や析出する結晶相などについて多くの共通点が見られる。特に ZrNi 系非晶質合金は、実用化の期待される多元系非晶質合金(Zr-Cu-Ni-Al 系など)の構成要素であることから多くの構造的研究がなされており結晶相由来の強固な化学的・幾何学的秩序構造が非晶質相の熱力学的な安定性に影響を与えることが示唆されている。本研究ではプレピークを示す非晶質合金で開発した方法論を典型的な非晶質合金に適用し、結晶相由来の短距離秩序構造が中距離領域に及ぼす影響を研究展開した。図 9(a)および(b)に、 $\text{Zr}_{70}\text{Co}_{30}$ 非晶質合金の動径分布関数および対応する干渉関数を示す。Co-Zr 相関は Zr-Zr 相関と明瞭に分離し、さらに Zr-Co 異種原子相関の短距離化と Zr-Zr 同種元素相関の長距離化が観察され、強固な異種元素結合の構造規範が明瞭に解析できた。図 10 に示す部分構造関数は、メインピークの低波数側で DRP モデルと RMC モデルに大きな差は見られず、中距離秩序構造はそれほど明瞭には発達していないことが示唆できる。Voronoi 多面体解析においても、従来から指摘されていた結晶由来の主要な短距離領域秩序構造の卓越するような特徴が観測できなかったことを考慮すると、本系非晶質構造は、若干の構成要素間の平均結合距離の変化にとどまり、結晶由来の短距離秩序構造に代表される特徴的な短距離秩序構造は発達していないことが示唆できる。中距離領域の構造的特徴を評価するため CNA-Bernal 多面体解析を実施した結果、いくつかの Bernal 多面体に関して、最近接共有元素に Co が富化する元素選択性が観察されるがその程度は $\text{Zr}_{80}\text{Pt}_{20}$ の例に比べて非常に弱い。そして、プレピーク信号が観測される $\text{Zr}_{80}\text{Pt}_{20}$ 非晶質合金に代表する合金系に特徴的であった非 Bernal 多面体の増加傾向は観測できなかった。これらの結果は、 $\text{Zr}_{70}\text{Co}_{30}$ 非晶質合金の中距離領域における幾何学的および化学的秩序構造の発達程度は皆無ではないが、プレピークを生じる $\text{Zr}_{80}\text{Pt}_{20}$ 非晶質合金のケースに比べて非常に弱いことを示している。以上の結果から $\text{Zr}_{70}\text{Co}_{30}$ 非晶質合金の短距離および中距離秩序構造に及ぼす化学的相互作用の影響は若干の原子間距離変化および元素選択性にとどまり、各元素周囲の構造的特徴は典型的な DRP 構造で説明可能であると結論できる。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 3 件)

- Nanometer-Sized Crystalline Clusters of IGZO Films Determined from the Grazing Incidence X-ray Scattering and Anomalous X-ray Scattering Data Combined with Reverse Monte Carlo Simulations.
Y. Waseda, K. Sugiyama and T. Kawamata
Materials Transactions, 59(11), 1691-1700(2018).
//doi: 10.2320/matertrans.M2018231
- Crystal Structure of the C-AlRuNi Phase.
R. Simura, K. Sugiyama, S. Suzuki and T. Kawamata
Materials Transactions, Vol. 58, No. 8, 1101-1105(2017).
//doi:10.2320/matertrans.M2017106
- Medium Range Ordering realized in $\text{Zr}_{80}\text{Pt}_{20}$ Amorphous Alloy.

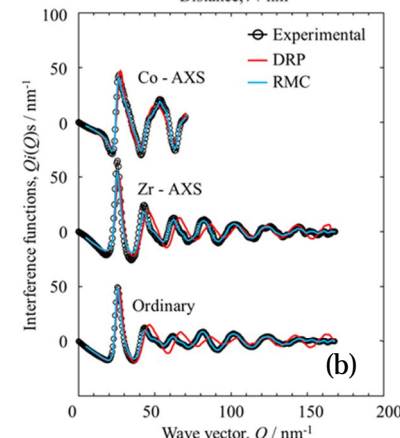
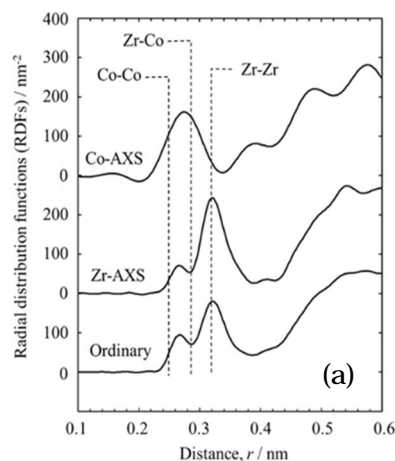


図 9. $\text{Zr}_{70}\text{Co}_{30}$ 非晶質合金の AXS-RMC 解析 (a) 動径分布関数および (b) 構造干渉関数

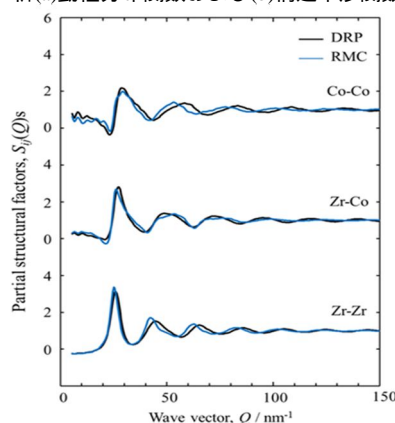


図 10. $\text{Zr}_{70}\text{Co}_{30}$ 非晶質合金の部分二体分布関数

[学会発表](計 10 件)

非晶質金属 $M_{90}Zr_{10}$ ($M=Fe,Co,Ni$)の構造解析
大志田 達郎, 川又 透, 杉山 和正
2018 年度量子ビームサイエンスフェスタ, つくば (2019).
X 線異常散乱法を用いた非晶質合金の中距離秩序構造解析
川又 透, 杉山 和正
日本分析化学会年会, 仙台 (2018).
X 線異常散乱法を用いた Ni-Nb 系非晶質合金の構造解析
黒田 燎, 有馬 寛, 杉山 和正, 川又 透
2016 年度量子ビームサイエンスフェスタ, つくば (2017).
Ni-Nb 系非晶質合金の局所構造単位
黒田 燎, 有馬 寛, 川又 透, 杉山 和正
日本金属学会 2017 年秋期講演大会(第 161 回), 札幌 (2017).
異常分散法を用いたチタノマグネタイトの陽イオン価数分布解析
奥部 真樹, 鷲海 太郎, 長瀬 敏郎, 佐々木 聡, 杉山 和正
日本結晶学会, 広島 (2017).
原子レベルの構造解析; 放射光異常散乱法の利用
杉山 和正
日本金属学会東北支部, 仙台 (2017).
AXS-RMC 法を用いた Zr-Co 系非晶質合金の構造解析
黒田 燎, 有馬 寛, 川又 透, 杉山 和正
日本金属学会東北支部, 仙台 (2017).
Crystalline approximants in the Al-rich part of the Al-Ru-Ni system
Shota Suzuki, Rayko Simura, Kazumasa Sugiyama, Akira Yoshiasa
13th International Conference on Quasicrystals (ICQ13), Nepal (2016).
Middle range ordering realized in Zr-Pt amorphous alloy and quasicrystalline approximants
Kazumasa Sugiyama, Toru Kawamata and T.Muto
13th International Conference on Quasicrystals (ICQ13), Nepal (2016).
アルカリゲルマン酸塩ガラスの局所構造
有馬 寛, 杉山 和正
日本鉱物科学会, 金沢 (2016).

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 有馬 寛
ローマ字氏名: ARIMA HIROSHI
所属研究機関名: 一般財団法人総合科学研究機構
部局名: 総合科学研究センター
職名: 研究員
研究者番号(8桁): 60535665

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 川又 透
ローマ字氏名: KAWAMATA TORU

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。