

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21084

研究課題名(和文) 協調原子移動型転位の運動による硬質結晶性材料の室温変形機構

研究課題名(英文) Deformation mechanisms of hard materials by non-conventional dislocation motion involving cooperative atomic shuffling

研究代表者

岸田 恭輔(Kishida, Kyosuke)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20354178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：複雑結晶構造を有する硬質結晶性材料の塑性変形機構の解明を目的とし、Fe-Cr系相や遷移金属シリサイドなどの種々の硬質材料について、単結晶マイクロピラー圧縮試験法による活動すべり系とその臨界分解せん断応力の同定、透過電子顕微鏡法による転位組織の解析といった実験研究と第一原理計算による理論的検討を横断的に行った。Fe-Cr系相ではZonal型転位の運動による塑性変形を実験的に世界で始めて確認し、転位芯部分における協調的原子移動モデルの構築に成功した。他の材料においても室温でのすべり変形の導入、変形モードの同定に成功し、得られた結果に基づき硬質材料の室温変形機構に関する考察を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得たFe-Cr系相における特異な転位の転位芯構造に関する知見はこの材料だけでなく、これまで実験的証拠の欠如のため十分に検討されてこなかった他の複雑構造を有する結晶性材料の変形機構の理解を深化させることにつながるため、学術的に非常に重要で意義がある。また本研究で得た他の硬質材料の室温塑性変形に関する結果とともに、各種硬質結晶材料の各種構造材料の強化相としての実用化の際の問題の一つである室温脆性の改善策の提案にもつながる重要な知見であるため、工業的・社会的にも十分に意義がある。

研究成果の概要(英文)：Room temperature deformation behavior of hard crystals with complex crystal structure, including Fe-Cr sigma phase and transition metal silicides, has been investigated by micropillar compression method. Operative deformation modes and their critical resolved shear stress for most materials investigated have been identified successfully. In Fe-Cr sigma phase, the activation of non-conventional slip by the motion of so-called zonal dislocations has been experimentally confirmed for the first time through the direct observation of the dislocation core structure by the atomic resolution electron microscopy. Atomic shuffling model in the dislocation core region has been proposed based on the observation. Knowledge gained on the dislocation core structure will lead to improved understanding of deformation mechanisms in this and other complex crystal structures and provide ways to improve the brittleness of these complex materials.

研究分野：金属物性

キーワード：変形機構 転位 硬質材料 協調原子運動

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

硬質結晶性材料として知られている金属間化合物材料(σ 相, μ 相, Laves 相など)やセラミックス材料(酸化物, 炭化物, 窒化物, 硼化物など)を析出物相として含むステンレス鋼や, 新規構造材料の候補であるハイエントロピー合金では, 適切な組織制御を施すことでバランスに優れた力学特性を発現しようという研究例が報告されるようになり, これらの合金系を中心に強化相としての硬質結晶性材料が注目を集めるようになってきている. しかしながらこれら硬質材料については, 一般に複雑な結晶構造のため脆性的であること, 大型単結晶が得られないこと, といった問題点に起因して, 実験的側面での精緻な解析とそれに基づいた理論的検討はなされておらず, 本質的な塑性変形能は十分に議論されていなかった. 我々は近年, 様々な硬質材料(高融点遷移金属シリサイド, MAX 相化合物, SiC など)を含む結晶性材料について, 単結晶マイクロピラー圧縮試験を系統的に行い, 本試験法が硬質性材料の室温塑性変形挙動の解明に有効であることを見出してきた. さらに, セメント相 Fe_3C や Fe-Cr 系 σ 相の単結晶マイクロピラー圧縮試験と変形後の試料の原子分解能電子顕微鏡観察により, 一部のすべり変形を担う転位の転位芯構造が, 通常転位のように隣接する 2 枚の原子層間でのせん断変形に対応するものではなく, 複数枚の原子層を含む領域内での複雑な協調的原子移動を伴う特異なものであることを示唆する予備的な実験結果を得た. Fe-Cr 系 σ 相で新たに観察した $\{110\}[001]$ すべりを担う特異な構造の転位に関しては, 同一の結晶構造を有する $\beta\text{-U}$ において活動する $\{110\}[001]$ すべりの転位のモデルとして Kronberg により 1959 年に提案されていた Zonal 転位[1]と同様のものである可能性が高いと予想されたが, Kronberg が提案した Zonal 転位モデルの妥当性の検証も含めた詳細な議論のためには, より精度を高めた転位芯構造の高分解能観察が不可欠であった. 同様の特異な転位の例としては, 同じく Kronberg により 1957 年に提案され, 一部の金属間化合物材料(C40 型遷移金属シリサイドや Laves 相)において活動が確認されているシンクロシアー型の転位[2]があるが, こちらについてもその詳細なメカニズムや活動条件等については不明な点が多かった. このような複雑な結晶構造を有する硬質結晶性材料中の特異な転位による変形機構についての理解を深めることは, 従来の転位論の枠組みを超えた新しい理論体系の構築につながるという点で学術的に重要であるだけでなく, 硬質結晶性材料の有効活用した新規構造材料開発にもつながるため, 工学的側面においても非常に重要な基礎研究課題である.

2. 研究の目的

本研究では硬質結晶性材料をはじめとする複雑結晶構造を有する結晶性材料の塑性変形機構, 力学特性を包括的に記述する新しい理論体系の構築ならびに同材料の工学的有効利用指針の確立を目指して, 上述の特異な転位の運動が観察された Fe-Cr 系 σ 相ならびに, これまでにバルク単結晶を用いた研究により高温域においてシンクロシアー型の転位の運動が確認されている C40 型シリサイドをはじめとする各種硬質結晶性材料において, 上述の特異な転位芯構造を持つ転位が活動する条件の詳細な実験的検証と同時に, 第一原理計算などに基づいた理論的検討を横断的に行うことを通じて, これらの材料の塑性変形機構を解明することを目的とした.

3. 研究の方法

(1) Fe-Cr 系 σ 相単結晶の塑性変形機構

$\text{Fe-50at.}\% \text{Cr}$ 組成を有する Fe-Cr 合金をアーク溶解により得た BCC 単相多結晶試料を 40% 冷間圧延したのちに, 740°C で 116 時間熱処理を行うことにより σ 相単相多結晶試料を得た. 得られた単相試料の表面を機械研磨, パフ研磨することにより鏡面に仕上げ, 走査電子顕微鏡内での後方散乱電子回折法(EBSD)により試料表面に現れている各結晶の方位解析を行った. その後, 所定の結晶方位を有する単結晶領域から集束イオンビーム(FIB)加工により, 様々な荷重軸方位を有する正方形断面を有する四角柱形状の単結晶マイクロピラー圧縮試験片を作製した. ピラーの断面の一辺の長さは $0.8\sim 10\ \mu\text{m}$ とし, 高さとのアスペクト比は 2~3 とした. 圧縮試験はフラットパンチ型ダイヤモンド圧子を備えたナノインデントーターを用いて, 室温, 大気中, 変位速度一定(初期歪速度 $1\times 10^{-4}/\text{s}$)の条件で行った. 圧縮試験前後の組織観察には SEM を, 変形後の転位組織の観察には透過電子顕微鏡(TEM), 走査透過電子顕微鏡(STEM)を用いた. また選択されるすべり面や分解反応に関する理論的検討のため, 第一原理計算による一般化積層欠陥エネルギーの理論計算を行った.

(2) C40 型遷移金属ダイシリサイド単結晶のマイクロピラー圧縮変形

光学式浮遊帯域溶融法により育成した六方晶 C40 型 TMSi_2 (TM : Nb, V, Cr, Ta)単結晶から所定の結晶方位を有するバルク単結晶試料を切り出した. 試料表面を鏡面に仕上げたのち, 集束イオンビーム(FIB)加工により四角柱形状のマイクロピラー試験片を作製した. 荷重軸方位としては, $(0001)\langle 2\bar{1}\bar{1}0\rangle$ 底面すべりに対するシュミット因子が最大となる $[11\bar{2}2]$ を選択した. ピラーの一辺の長さは $1\sim 10\ \mu\text{m}$ とし, 高さとのアスペクト比は約 3 とした. 圧縮試験の初期歪速度は $6\times 10^{-4}/\text{s}$ で一定とし, 圧縮試験は全て室温, 大気中で行い, 圧縮試験前後の組織観察には SEM を, 変形後の転位組織観察には TEM, STEM を用いた.

4. 研究成果

(1) Fe-Cr 系 σ 相単結晶の塑性変形機構

図 1 に Fe-Cr 系 σ 相の結晶構造ならびに完全結晶部分の高分解能 STEM 像を示す. Fe-Cr 系 σ 相の結晶構造は正方晶 $D8_b$ 型(空間群: $P4_2/mnm$, $a = 0.8838$ nm, $c = 0.4569$ nm(Fe-50at.%Cr))であり, 5 つの異なる原子サイトから構成されるが, それらのサイトのすべてが Fe 原子と Cr 原子により混合占有されているため, 実質的には β -U の結晶構造である正方晶 A_b 型と等価な構造とみなすことができる. $D8_b/A_b$ 型構造は原子配列の異なる 3 種の原子層(レイヤー A, B, C)が c 軸方向に ACBC の順で積層した構造と記述できる. これらの 3 種の原子層のうち, レイヤー A, B がカゴメタイプの原子配列を有し, 互いに 90 度の回転関係にある.

このような複雑な結晶構造を有する Fe-Cr 系 σ 相について, 荷重軸方向ならびに試験片サイズの関数として単結晶マイクロピラー圧縮試験を行ったところ, $[001]$ をすべり方向とする 2 種類の変形モード, $\{110\}[001]$ および $\{100\}[001]$ ならびにそれ以外の 2 種類の変形モードの合計 4 種類の変形モードの室温での活動を確認した. 図 2 に荷重軸方位 $[5\ 6\ 11]$ の単結晶マイクロピラー圧縮試験の結果を示す. 変形後の試料表面に現れるすべり線のトレース解析により, すべり系が $(1\bar{1}0)[001]$ であることを確認した. 図 2(c) の TEM 明視野像中において矢印で示してあるすべり集中部の高分解能 STEM 観察により得た $[001]$ 転位の刃状転位の転位芯原子構造像を図 3 に示す. 転位芯周りに描いたバーガースベクトル \mathbf{b} が $[001]$ であることが確認できる. また今回のより高精細な高分解能観察の結果, 結晶に $[001]$ 方向のずれが生じている原子面の位置の特定にも成功した. 一般的な金属結晶におけるすべり変形は一つの原子面上での転位の運動により生じるが, 今回観察した Fe-Cr 系 σ 相中の $(1\bar{1}0)[001]$ 転位では, マクロなすべり面である $(1\bar{1}0)$ に対してほぼ垂直な方向に約 1nm ほど離れた位置にあたかも 2 本の部分転位 ($\mathbf{b} = 1/2[001]$) に相当. 図中ではおよその位置を逆 T マークで示してある)が並んで存在しているように見える転位芯構造をとっていることがわかる. 仮に通常の変位のように 1 枚のすべり面において $\mathbf{b} = 1/2[001]$ の部分転位が単独で活動した場合を考えると, その部分転位の後ろに積層欠陥(レイヤー A とレイヤー B が接するよう欠陥)が形成されるはずであるが, Weak-beam 法による観察においても積層欠陥は全く観察されなかった. このことは転位芯部分において積層不正をうまく解消するように原子が協調運動をしていることを意味している. このような転位構造は, Kronberg により β -U において活動する $\{110\}[001]$ 転位について考案された Zonal 転位モデル(図 4)と類

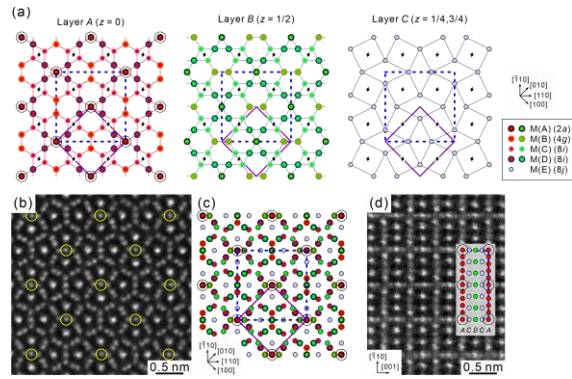


図 1. Fe-Cr 系 σ 相の結晶構造ならびに完全結晶部分の高分解能 STEM 像. (a)結晶構造を構成する 3 種の原子層, (b)[001]入射 STEM 像, (c)[001]からみた投影図, (d)[110]入射 STEM 像.

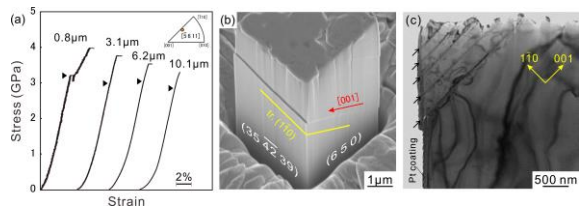


図 2. Fe-Cr 系 σ 相の単結晶マイクロピラー(荷重軸 $[5\ 6\ 11]$)の圧縮試験結果. (a)応力-ひずみ曲線, (b)変形後試料の SEM 像, (c)変形後試料の TEM 明視野像.

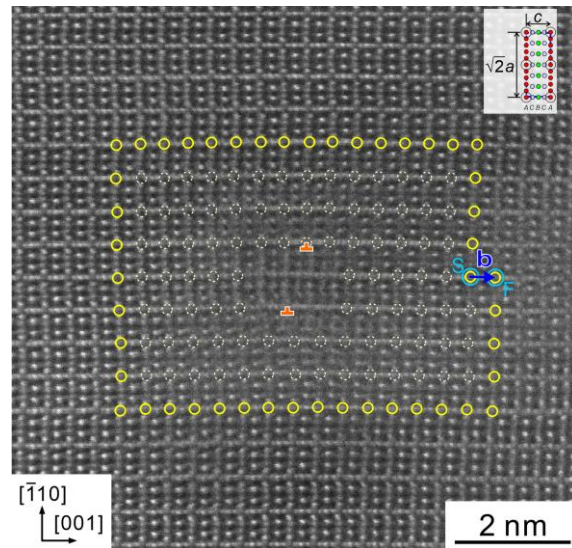


図 3. Fe-Cr 系 σ 相中の $(1\bar{1}0)[001]$ 刃状転位の転位芯部分の高分解能 STEM 像.

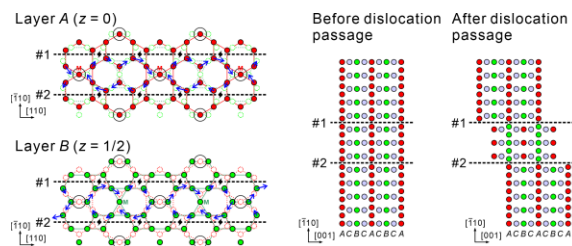


図 4. Kronberg により提案された β -U 中の $\{110\}[001]$ 転位の Zonal 転位モデル[1]. 面#1 と面#2 で挟まれた領域が Shear zone.

似のものであると考えられるが、先行モデルとは 2 点、1) 協調的原子移動が生じる領域(Shear zone)を規定する 2 枚のすべり面の位置、2) Shear zone の高さ(2 枚のすべり面間の距離)、が大きく異なっていた。そこで観察結果を基に Zonal 転位の転位芯構造を再現しうる協調的原子移動モデルを新たに考案した(図 4,5,6)。得られたモデルは Kronberg モデルにおいて考えられていたカゴメレイヤー間をまたぐ原子移動(中間のレイヤー C を通過するものであるため、実現はかなり困難であると予想される)を必要とせず、すべての協調的原子移動がそれぞれのカゴメレイヤー内のみ起こるタイプのものであるため、従来モデルよりもはるかに容易に起こりうるモデルであると考えられる。また $\{110\}[001]$ すべりと共通のすべり方向を持つ $\{100\}[001]$ すべりを担う転位についても詳細な転位芯構造観察により同様の Zonal 転位であることを確認し、その転位芯構造モデルの考案にも成功した。これらの結果と第一原理計算による一般化積層欠陥エネルギーの計算結果の比較から Zonal 転位を特徴づけるすべり面の位置ならびにそれにより規定される Shear zone の高さについては、結晶の周期性だけでなく、部分転位間の弾性相互作用も重要な役割を果たしていることが示唆された。また協調的原子移動の際には異なる原子サイトへの移動が不可避となること明らかとなったことから、 σ 相中においてこのタイプの Zonal 転位を活動させるためには、各原子サイトの混合占有度が十分に高いことが必要であることが示唆された。本研究により σ 相の強化相としての有効利用のための重要な基礎的知見を得ることができた。

(2) C40 型遷移金属ダイシリサイド単結晶のマイクロピラー圧縮変形

バルク単結晶を用いた機械試験の報告例によれば、C40 型シリサイドは 400°C 以上の高温域においてのみ $(0001)\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 底面すべりの活動により塑性変形し、 VSi_2 , NbSi_2 , TaSi_2 では通常のタイプの底面転位の分解反応が観察されるのに対し、 CrSi_2 の底面転位はシンクロシアー型の分解をしていることが知られている。本研究で単結晶マイクロピラーを用いた室温圧縮試験を行ったところ、 VSi_2 , CrSi_2 , NbSi_2 , TaSi_2 のいずれにおいても底面転位の運動による塑性変形が可能であることを見出した。図 7 に CrSi_2 の単結晶マイクロピラーの圧縮試験結果の例を示す。また変形後の試料の転位組織観察を行ったところ、高温でシンクロシアー型の分解が観察されていた CrSi_2 において、 $1/3\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 完全転位はシンクロシアー型ではなく、一つのすべり面上で 2 本の $1/6\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 部分転位に分解する通常タイプの分解反応をしていることを確認した(図 8)。このことは CrSi_2 において温度の低下に伴い変形モードがシンクロシアー型から他の C40 型シリサイドと同様の通常型へと遷移したことを意味している。このことは C40 型シリサイドの底

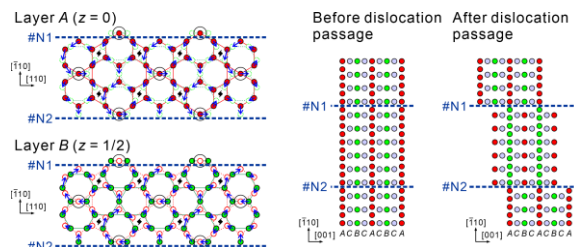


図 5. 本研究の成果を基に提案した Fe-Cr 系 σ 相中の $\{110\}[001]$ 転位の Zonal 転位モデル。面 #N1 と面 #N2 で挟まれた領域が Shear zone。

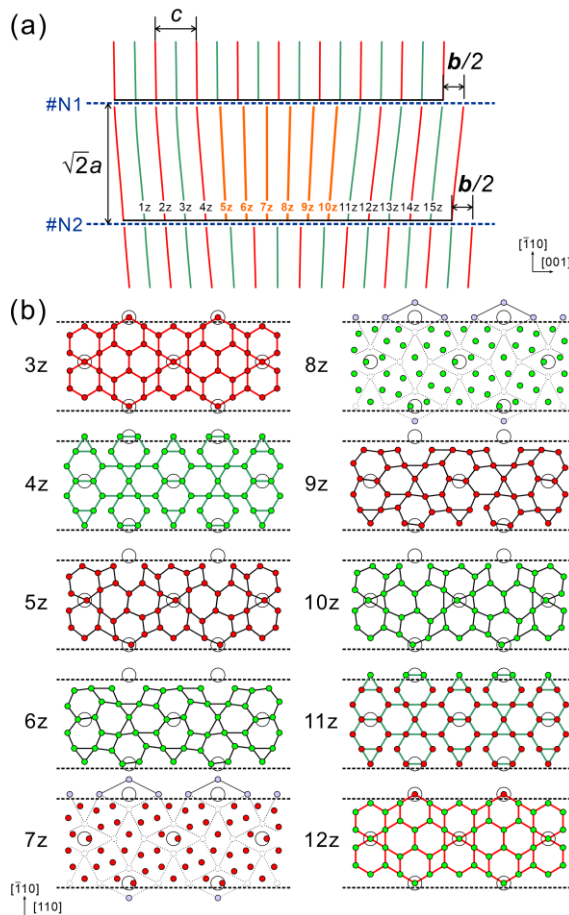


図 6. Fe-Cr 系 σ 相中の $\{110\}[001]$ Zonal 転位の Shear zone 内での協調的原子移動モデル。

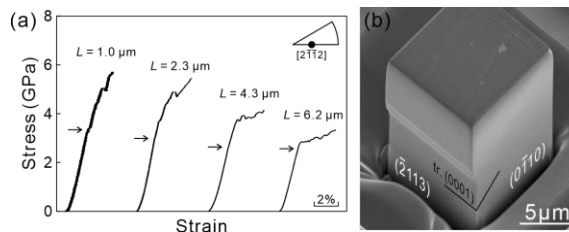


図 7. C40 型 CrSi_2 単結晶のマイクロピラー圧縮試験。(a) 応力 - ひずみ曲線、(b) 変形後試料の SEM 像。

面

面すべりにおいて協調的原子移動を伴うシンクロシア型の変形機構が働くためには温度の助けが不可欠であることを示唆している。一方、 VSi_2 、 NbSi_2 、 TaSi_2 においては、高温変形時と同じ通常型の部分転位への分解をしていることを確認した。室温での単結晶マイクロピラー試験により得た降伏応力をもとに求めた臨界分解せん断応力(CRSS)は、いずれの試料においても試験片サイズの減少に伴い上昇する傾向を示し、CRSSの試験片サイズ依存性はべき乗則で近似できることがわかった。FCC金属単結晶の先行研究の結果によれば、試験片サイズが $20\sim 30\mu\text{m}$ において、マイクロピラー試験で得られるCRSSとバルク試験により得られるCRSSがほぼ一致することが知られている。そこで本研究で得たCRSSのサイズ依存性のべき乗則関係の外挿から室温におけるバルクCRSSを推定した。 VSi_2 、 NbSi_2 、 TaSi_2 の底面すべりの室温バルクCRSSの推定値は変形開始温度と非常に良い正の相関があることが確認できるが、 CrSi_2 の室温バルクCRSSの推定値はその近似曲線から推定される値よりもはるかに低い値となっていることがわかる(図9)。これは CrSi_2 では転位の分解様式、すなわち変形機構が高温と室温で異なっていることに起因していると考えられる。図10にバルク単結晶の高温変形時のCRSSの温度依存性と本研究で推定した室温バルクCRSSの推定値を比較したものを示す。硬質材料の一種である半導体結晶の場合と同様にひずみ速度 $\dot{\gamma}$ とCRSS(τ)が $\dot{\gamma} \propto \tau^m \exp(-Q/kT)$ の関係を満たすと仮定すると、ひずみ速度一定の条件下ではCRSSの対数と温度の逆数の間には線形関係が成立することになる。実際に報告されている高温変形時のCRSSの値はその関係を満たしているが、本研究で得た室温バルクCRSSの推定値はいずれも線形関係の外挿値よりも低い値をとることがわかる。このことは CrSi_2 だけでなく、転位の分解様式の遷移が見られなかった他の VSi_2 、 NbSi_2 、 TaSi_2 に関しても、マイクロピラー試験におけるCRSSの値を決定する支配因子が高温変形のものとは異なっている可能性を示唆しているが、その詳細なメカニズムについてはさらなる調査が必要である。

(3) その他の硬質結晶性材料の単結晶のマイクロピラー圧縮変形

Fe-Cr系 σ 相と類似のカゴメ型原子配列を有する α -Mnや各種遷移金属シリサイド、セメントイト、遷移金属ボライド等についても、協調的原子移動を伴う転位の活動の有無等について実験・理論の両面から検証を試みた。いずれの試料においても室温での塑性変形を確認することに成功し、一部の試料において、Zonal型あるいはシンクロシア型転位の運動の可能性を示唆する結果が得られたが、結晶構造の複雑さに起因した転位芯構造の高分解能観察の困難さ等のため、協調的原子移動を伴う転位の活動を示す明確な実験的証拠を得るには至っていない。硬質結晶性材料の塑性変形機構の包括的理解のためにも、これらに関しては引き続き調査を続ける必要がある。

<引用文献>

- [1] M.L. Kronberg, J. Nucl. Mater. 1 (1959) 85-95.
- [2] M.L. Kronberg, Acta Metall. 5 (1957) 507-524.

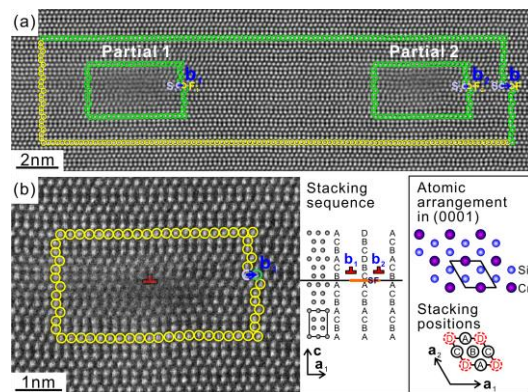


図8. CrSi_2 中の底面a転位の転位芯構造。

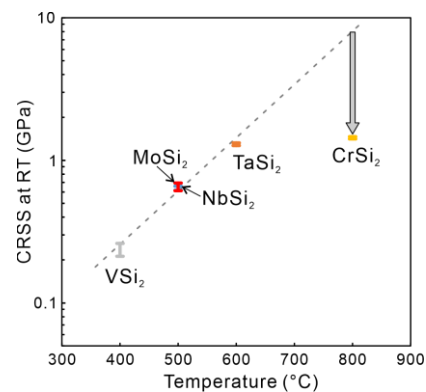


図9. C40型シリサイドの室温バルクCRSSの推定値とバルク単結晶の変形開始温度の相関。

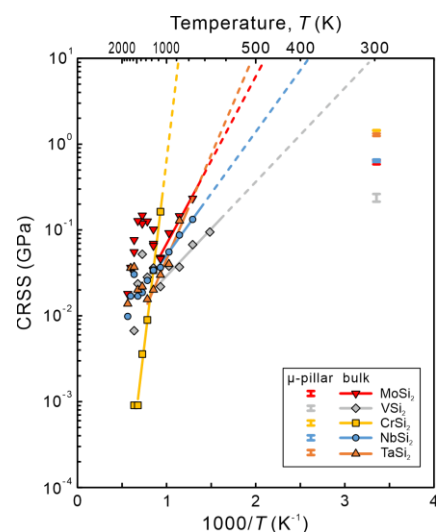


図10. C40型シリサイドの室温バルクCRSSの推定値とバルク単結晶の圧縮試験により得られたCRSSの温度依存性の比較。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Kishida Kyosuke, Fukuyama Takayoshi, Maruyama Takuto, Inui Haruyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Room temperature deformation of single crystals of Ti ₅ Si ₃ with the hexagonal D88 structure investigated by micropillar compression tests	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17983-1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-75007-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kishida Kyosuke, Maruyama Takuto, Fukuyama Takayoshi, Inui Haruyuki	4. 巻 21
2. 論文標題 Micropillar compression deformation of single crystals of -Nb ₅ Si ₃ with the tetragonal D81 structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science and Technology of Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 805~816
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/14686996.2020.1855065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Chen Zhenghao, Paul Bhaskar, Majumdar Sanjib, Okamoto Norihiko L., Kishida Kyosuke, Inui Haruyuki, Otani Shigeki	4. 巻 11
2. 論文標題 Room-temperature deformation of single crystals of ZrB ₂ and TiB ₂ with the hexagonal AlB ₂ structure investigated by micropillar compression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14256
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-93693-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kishida Kyosuke, Nakatsuka Satoshi, Nose Hiroaki, Inui Haruyuki	4. 巻 223
2. 論文標題 Room-temperature deformation of single crystals of transition-metal disilicides (TMSi ₂) with the C11b (TM = Mo) and C40 (TM = V, Cr, Nb and Ta) structures investigated by micropillar compression	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 117468
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actamat.2021.117468	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kishida Kyosuke, Okutani Masaomi, Inui Haruyuki	4. 巻 228
2. 論文標題 Direct observation of zonal dislocation in complex materials by atomic-resolution scanning transmission electron microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 117756
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2022.117756	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsuji Nobuhiro, Ogata Shigenobu, Inui Haruyuki, Tanaka Isao, Kishida Kyosuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Proposing the Concept of Plaston and Strategy to Manage Both High Strength and Large Ductility in Advanced Structural Materials, on the Basis of Unique Mechanical Properties of Bulk Nanostructured Metals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Plaston Concept	6. 最初と最後の頁 3 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-16-7715-1_1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Inui Haruyuki, Kishida Kyosuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Plaston - Elemental Deformation Process Involving Cooperative Atom Motion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Plaston Concept	6. 最初と最後の頁 119 ~ 131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-16-7715-1_6	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Inui Haruyuki, Kishida Kyosuke, Li Le, Manzoni Anna Maria, Haas Sebastian, Glatzel Uwe	4. 巻 47
2. 論文標題 Uniaxial mechanical properties of face-centered cubic single- and multiphase high-entropy alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MRS Bulletin	6. 最初と最後の頁 168 ~ 174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1557/s43577-022-00280-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 岸田 恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 D81型構造を有する遷移金属シリサイド単結晶の室温変形挙動
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期（第167回）講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上村 遥, 岸田 恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 Mo添加NbSi ₂ /Nb ₅ Si ₃ 一方向凝固共晶合金の微細組織
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期（第167回）講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森下 文寛, 門田 信幸, 岸田 恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 セメントタイト単結晶マイクロピラーの圧縮変形組織
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期（第167回）講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大影 晃平, 岸田 恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 Mg-Zn-Y LPSO 相単結晶におけるキンク組織形成条件
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期（第167回）講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Micropillar Compression Deformation of Transition-Metal Disilicides with the C40 Structure
3. 学会等名 2020 MRS Virtual Spring/Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohei Okage, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Influences of Loading Axis Orientation and Specimen Shape on Kink-Band Formation in Single Crystals of Mg-Zn-Y LPSO Phase Investigated by Micropillar Compression Tests
3. 学会等名 2020 MRS Virtual Spring/Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruka Uemura, Kosei Takeda, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Microstructure and Crystallographic Orientation Relationships in Directionally Solidified NbSi ₂ /Nb ₅ Si ₃ Eutectic Composites with Mo Addition
3. 学会等名 2020 MRS Virtual Spring/Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 6H-SiC単結晶の室温塑性変形挙動
3. 学会等名 日本金属学会2021年春季(第168回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上村 遙, 岸田 恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 Mo添加NbSi ₂ /Nb ₅ Si ₃ 共晶合金の微細組織と力学特性
3. 学会等名 日本金属学会2021年春期(第168回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 広崇, 奥谷 将臣, 岸田 恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 -Mn単結晶マイクロピラーの圧縮変形挙動
3. 学会等名 日本金属学会2021年春期(第168回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Micropillar compression deformation of transition-metal disilicides with the C11b and C40 structures
3. 学会等名 11th International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC ' 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤充洋, 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 Cr ₂₃ C ₆ 単結晶マイクロピラーの圧縮変形挙動
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期(第169回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸田恭輔, 大影晃平, 乾 晴行
2. 発表標題 Mn-Zn-Y LPSO相単結晶マイクロピラーにおけるキンク帯形成条件
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期(第169回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木広崇, 奥谷将臣, 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 -Mn単結晶の室温変形挙動
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期(第169回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Suzuki, M. Okutani, K. Kishida, H. Inui
2. 発表標題 Room temperature plastic deformation of hard and brittle crystals investigated by micropillar compression method
3. 学会等名 Intermetallics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 マイクロ機械試験で探るセメントタイトおよびパーライト単結晶の力学特性
3. 学会等名 ISSS 2021ポストシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸田恭輔
2. 発表標題 マイクロ機械試験と電子顕微鏡観察による層状化合物の塑性変形解析
3. 学会等名 令和3年度 第二回軽金属学会「LPSO / MFS構造材料研究部会」第82回高性能Mg合金創成加工研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤充洋, 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 Cr ₂₃ C ₆ 単結晶マイクロピラーの室温圧縮変形
3. 学会等名 日本金属学会2022年春季(第170回)講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Qi Xing, 岸田恭輔, 野瀬浩晃, 乾 晴行, 辻 伸泰
2. 発表標題 TWIP鋼単結晶マイクロピラーにおける変形双晶形成条件
3. 学会等名 日本金属学会2022年春季(第170回)講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木広崇, 奥谷将臣, 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 Fe-Cr系 相におけるZonal転位の転位芯構造
3. 学会等名 日本金属学会2022年春季(第170回)講演大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 乾 研究室のページ
<http://imc.mtl.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------