

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00824

研究課題名(和文) 脆性金属間化合物の低温変形能とその工学的応用

研究課題名(英文) Low-temperature deformability of brittle intermetallics and its engineering applications

研究代表者

乾 晴行 (INUI, HARUYUKI)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：30213135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロピラー圧縮試験から、バルクでは高温でなければ全く変形能を示さない脆性金属間化合物材料における低温変形能の解明を行い、その工学的応用を探った。低温変形能の発現を鉄鋼材料の脆化相であるラーベス相およびシグマ相金属間化合物に加えてパーライト鋼の強化相であるセメンタイト相金属間化合物で見出した。セメンタイト相化合物では広い試料サイズ範囲で脆性割れは生じないが、シグマ相、ラーベス相となるほど脆性破壊が生じる確率が高くなる。破壊靱性値が小さく、塑性変形に許容される予亀裂の臨界サイズが小さいため、転位の活性化応力に到達する前に破断が生じるためである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バルクでは発現しない脆性材料の低温変形能という現象そのものが新規な発見で学術的独自性が非常に高いが、その発現は原子が協調的励起を受けている体積に対応する転位核生成の臨界体積により記述でき、これを微小な試験片体積で高い応力レベルの実験ができるマイクロピラー試験によって実験的に評価する点に高い創造性があり、学術的意義がある。ラーベス相、シグマ相などの脆性金属間化合物の低温変形能の発現を調べ、この低温変形能のメカニズム解明を通して、脆性破壊が生じる臨界サイズが解明され、オーステナイト系耐熱鉄鋼材料におけるこれらGCP相金属間化合物に係わる脆化を回避する方策の開拓ができ、社会的意義も高いといえる。

研究成果の概要(英文)：Low-temperature deformability has been investigated for brittle intermetallic materials that do not exhibit deformability at ambient temperature in the bulk form, by means of micropillar compression testing. Low-temperature deformability is observed not only for sigma-phase and Laves-phase intermetallics, embrittlement phases in steels but also a cementite-phase carbide, strengthening phase in in pearlite steel. In cementite, brittle failure does not occur for specimens in the wide range of specimen size, but the propensity for brittle failure increases in the sigma-phase intermetallic and in the Laves-phase intermetallic more significantly. This is due to the decreased fracture toughness that causes a smaller critical notch size for brittle failure to occur before the stress reaches the level for dislocation generation.

研究分野：材料物性

キーワード：低温変形能 マイクロピラー 降伏応力 サイズ依存性 転位核生成 臨界体積 脆性材料 転位

1. 研究開始当初の背景

多くの教科書に「金属間化合物は鉄鋼材料など構造材料への混入が毛嫌いされる」と記述され(例えば、「金属間化合物と材料」, 日本材料科学会編, (裳華房,1995)), これは金属学における常識として長年信じられている. 金属間化合物が一般に脆く, 材料を脆化させるためである. 鉄鋼材料ではいわゆる GCP(Geometrically Close Packed)相と総称されるラーベス相, シグマ相, ミュー相などの金属間化合物がこれに相当する. 現実にこれらの金属間化合物は非常に脆く, かなり変形温度を増大させない限り塑性変形することはなく, 室温近傍では脆性的に破断する. しかし, 最近の我々の微小体積試験片を用いたマイクロピラー変形の研究から, 非常に脆性的と知られている多くの GCP 相金属間化合物でバルクでは発現しない低温変形能が存在することが明らかとなりつつあり, その活動応力にはバルク試験片の実験では明らかに出来ない特異な試験片サイズ依存性があることが明らかとなってきた. すなわち, 脆性材料の典型例と考えられる 6H-SiC(六方晶)単結晶を唯一のすべり系である底面 a すべりが活動する方位で圧縮すると, バルクでは最低でも 1200°Cの変形温度が必要であるが, ミクロンオーダー(1~10 μm)のマイクロピラー試験片では数 GPa オーダーの非常に高い臨界分解せん断応力(CRSS)を伴って室温でも底面 a すべりの活動が可能となる. また, 圧縮軸方位を変えると, バルクでは観察されたことがない柱面 a すべりの活動が更に高い応力レベルで観察される. 興味深いのは, 試験片サイズをサブミクロンオーダー(500-800nm)まで小さくしても, また, バルクの高温変形で底面 a すべり転位を導入しておいても, その CRSS は殆ど試験片サイズに依存せず一定値を示すことである. 低温変形能が非常に高い応力レベル(数 GPa オーダー)で起こり, CRSS が予歪や試験片サイズに殆ど依存しないという事実は, (1)バルクとは異なる新規で特異な変形機構が低温(室温を含む)で働いており, (2) この CRSS は転位の核生成応力そのものであり, 転位移動の活性化体積と同等あるいはそれより少し小さな転位核生成の臨界体積が存在する可能性を示唆している. 破断が先行するバルクでは発現しない新規な力学物性である「脆性材料の低温変形能」はどのようなメカニズムで発現するのか? その発現をもたらす転位核生成の臨界体積は何によって決定されるのか? これこそ本研究の核心をなす「学術的問い」であり, 低温変形能」のメカニズム解明とともに転位核生成の臨界体積(活性化体積)という新規な観点から解明すべく, 本研究の着想に至った.

2. 研究の目的

脆性 GCP 相が混入(析出)すると鉄鋼材料など構造材料は脆化することが知られている. ミクロンサイズの微小試料で見出された低温変形能から, このような構造材料の GCP 相金属間化合物に係わる脆化を回避する方策を見出すことができるのか? 低温変形能の工学的応用の最重要課題であり, 本研究の究極の目的である. 本研究では, オーステナイト系耐熱鉄鋼材料の脆性 GCP 相である Fe_2Nb ラーベス相化合物, FeCr シグマ相化合物およびパーライト鋼の強化相である Fe_3C セメンタイト相化合物の単結晶を用いて, ミクロンサイズの微小試料を用いたマイクロピラー圧縮試験から, 破断が先行するバルクでは発現しない新規な力学物性である低温変形能をそのメカニズムとともに転位核生成の臨界体積(活性化体積)という新規な観点から解明することを目指した. 「脆性金属間化合物材料の低温変形能」の出現には転位の運動が必要であり, その目安として破壊靱性値に着目し, 破壊靱性値を実測し, 低温変形能の出現との相関から, その発現メカニズムの解明を目指した. 転位核生成の臨界体積はバルク試料では評価し得ない新規な力学物性パラメーターで, 超高温材料や複合材料として実用上重要な靱性向上のための情報も抽出しつつ, 結晶構造物性に関する新たな学問分野を開拓したい.

3. 研究の方法

本研究では、オーステナイト系耐熱鉄鋼材料の脆性 GCP 相である Fe_2Nb ラーベス相化合物、 FeCr シグマ相化合物およびパーライト鋼の強化相である Fe_3C セメント相化合物の単結晶を供試材として選定し、マイクロピラー試験から低温変形能における CRSS の試料サイズ依存性、低温変形能が出現する臨界試料サイズを求め、転位など変形組織の原子レベルでの観察も含めた透過電子顕微鏡観察から変形メカニズムの解明を試みる。特に、(1) CRSS の特異な試料サイズ依存性、低温変形能出現の臨界試料サイズは何により決定されるか、(2) 力学的に不安定な「協調的に励起された原子集団の体積」が転位核になる場合、その核のサイズは何により決定されるのか、を実験的に解明して、バルク試料では評価し得ない新規な力学物性パラメーターである核生成臨界体積の物理的意味を解明し、「協調的に励起された原子集団の体積」として転位核生成の学術的記述を試みる。具体的には、(1) マイクロピラー試験片作製、(2) マイクロピラー圧縮試験、(3) マイクロビーム破壊靱性試験を研究項目として、研究を進める。

(1) マイクロピラー試験片作製: マイクロピラー試験片は、単結晶あるいは粗大結晶粒から予測される活動すべり系が圧縮軸と 45° 傾くように FIB 加工(現有)により切り出す。試験片は正方形断面、アスペクト比 2~3 とし、試験片サイズ $300\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ とする。

(2) マイクロピラー圧縮試験: マイクロピラー圧縮試験をフラットパンチを装着したナノインデントーターで行う。臨界分解せん断応力(CRSS)の試料サイズ依存性はバルクの変形開始温度と密接に関連している可能性が高い。バルクの変形開始温度の低下とともに CRSS に試料サイズ依存性が現われる可能性があり、その傾き(試料サイズを d として $\sigma_{\text{CRSS}} \propto d^n$ と表せば、べき係数 n に対応)が大きいほど、転位核生成に要する臨界体積が大きくなると考えられ、転位核生成に要する臨界体積との相関の確立を目指す。

(3) マイクロビーム破壊靱性試験: FIB 加工でマイクロ試料にシェブロン・ノッチを導入して評価した破壊靱性値は、脆性材料ではバルクの値とよく一致することが知られている。試料サイズ d のマイクロピラー試料の低温変形での CRSS (σ_{CRSS}) と長さ c のクラックが成長する応力を表す単純な式 ($\sigma_{\text{F}} = K/(\pi c)^{1/2}$) を用いれば、クラックの長さが $c = 1/2d$ になれば破壊が起こるとすると、低温変形能が生じる臨界試料サイズは $d_{\text{crit}} = (\pi/2)^{-1/2} K/\sigma_{\text{CRSS}}$ と荒く見積もることができる。すなわち、破壊靱性値 K が大きくなるほど臨界試料サイズは大きくなる。 σ_{CRSS} にも依るが、破壊靱性値が小さければ臨界試料サイズはサブミクロン、ナノ・オーダーになる可能性があり、現時点でミクロンサイズの試料では低温変形能が見つかっていない B_4C などではさらに小さな試料サイズで低温変形能が出現する可能性もあり、広範な脆性材料で、破壊靱性値、転位核生成の臨界サイズとの相関を確立する。

4. 研究成果

Fe_2Nb (六方晶系 C14 型構造)ラーベス相単結晶は、バルクでは変形開始温度が 1000°C を超えるものの、ミクロンサイズの試験片では室温でも変形が可能で、数 GPa オーダーと非常に高い応力で活動する複数のすべり系があることが分かった。 Fe_2Nb ラーベス相単結晶をバルク結晶で報告されている唯一のすべり系である底面 a すべりが活動する方位で圧縮すると、バルクでは最低でも 1000°C の変形温度が必要であるが、ミクロンオーダー ($1\sim 10\mu\text{m}$) のマイクロピラー試験片では GPa オーダーの非常に高い臨界分解せん断応力(CRSS)を伴って室温でも底面 a すべりの活動が可能となる。また、圧縮軸方位を変えると、バルクでは観察されることがない錐面 a すべりの活動が更に高い応力レベルで観察される。興味深いのは、試験片サイズをサブミクロンオーダー ($500\sim 800\text{nm}$) まで小さくしても、また、バルクの高温変形で底面 a すべり転位を導入しておいても、その CRSS は殆ど試験片サイズに依存せず一定値を示すことである。この低温変形能は SiC で観察された特徴と非常によく一致する。注目すべきは、同一の方位、試料サイズでも低温変形能を示す場合もあれば、脆性破壊する場合もあることである。こ

れは、破壊靱性値が小さく、塑性変形に許容される予亀裂の臨界サイズが小さいため、転位の活性化応力に到達する前に破断が生じるためである。

FeCr シグマ相金属間化合物は、オーステナイト系ステンレス鋼や Cr を含む耐熱鋼、Ni 基超合金などに、長時間使用中に析出し、材料を脆化させる脆化相として知られている。この脆さの原因は複雑な結晶構造(カゴメ原子層を含む正方晶系構造)に起因することは明白である。しかし、シグマ相金属間化合物がどの程度、なぜ、脆いのかについては全く明らかではない。この金属間化合物相がバルク状態では全く塑性変形することがないためである。しかし、ミクロンオーダーのマイクロピラー試験片では、低温変形能を示し広範囲の結晶方位範囲で 1.5~2 GPa 程度の CRSS を伴って室温でも塑性変形が可能である。活動するすべり系は 4 種類確認された。これら 4 種類のすべり系のすべり面ですべりに伴う原子の重なり体積を計算し転位分解の可能性を考察した。例えば、{100}すべり面上では[001]方向には重なり体積には準安定な領域は見いだせないが、<010>方向にはほぼ中央に重なり体積が小さくなる準安定な領域が見いだせる。このことは、{100}[001]すべりを担う[001]転位は分解することなく完全転位として運動するものの、{100}<010>すべりを担う<010>転位は 2 本の部分転位に分解して運動することを意味する。また、他の 2 つのすべり系についても、転位は分解することなく完全転位として運動することが予測できた。これらの結果は透過電子顕微鏡を使った転位観察ですべて実証された。これら 4 つのすべり系の活動応力 CRSS はいずれも GPa オーダーと高いが、その試験片サイズ依存性は非常に小さい。そのため CRSS を平均値として評価すると、活動すべり系の CRSS はすべりを担う転位のバーガースベクトルの大きさとかなり相関しているが、重なり体積最大値との相関はそれほど高くはないことが明らかとなった。{110}[001]すべりは 4 つのすべり系の中で最も CRSS が低く、広い結晶方位範囲で活動する。このすべりを担う[001]転位は分解することなく完全転位として活動するが、いわゆる Zonal 転位と呼ばれる形態で運動していることを原子分解能電子顕微鏡法により明らかにした。シグマ相化合物では、六角原子配列を伴うカゴメ層が(001)面を形成し、互いに[001]軸周りに 90°回転した 2 種のカゴメ層が[001]軸方向に積層した結晶構造であるため、転位のバーガースベクトルが、この(001)カゴメ層と直交する場合、すべり面上で 2 種のカゴメ層がすれ違い大きな抵抗となるため、カゴメ層の 6 角網目構造を単位としてその Zone 内で回転を起こし、このような原子の協調運動のもと転位の運動が起こる。Zonal 転位の活動により生じると考えられるこのすべり系で CRSS が他に比べて低いことは、このようなカゴメ層の 6 角網目構造の回転を伴う原子の協調運動のもとでの転位運動が有利であることを示唆し、シグマ相化合物の変形能改善に向けて重要なポイントが得られたと言える。

Fe₃C(斜方晶)は所謂セメンタイト相化合物であり、BCC-Fe(フェライト)とパーライトと呼ばれる層状組織を形成する。線材に加工され、合金元素を多量に含まない炭素鋼では最高強度を示し、中には 5~6 GPa を超える非常に高い強度を持つものもある。一般的にはセメンタイトは硬くて脆いと信じられ、伸線加工ができていない理由は明らかではない。しかし、試料サイズをミクロンオーダー(1~10μm)まで小さくすると、低温変形能を示し広範囲の結晶方位範囲で 1~2 GPa 程度の CRSS を伴って室温でも塑性変形が可能である。活動するすべり系は 5 種類確認された。5 種類のすべり系の中では(010)[100]すべり系の CRSS が最も低く、最も広い結晶方位範囲で活動する。このすべり系のすべり面(010)で γ -surface を計算すると、セメンタイトの構造ユニットである Fe₆C 3 角プリズムを破壊しないようにすべり面が選択され、2 本の部分転位に分解することが明らかとなった。実際に透過電子顕微鏡観察により、明瞭に 2 本の部分転位が観察された。これ以外の 4 つのすべり系の活動応力は(010)[100]すべり系の CRSS よりもはるかに高いが、変形過程においてセメンタイトの構造ユニットである Fe₆C 3 角プリズムを必然的に破壊しなければならないためと考えられる。パーライトが伸線加工される場合に活動が予測される 3 つのすべり系についても、同様の解析ができ、パーライトの伸線加工が可能な理由が明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Paul Bhaskar, Okamoto Norihiko L., Kusakari Misato, Chen Zhenghao, Kishida Kyosuke, Inui Haruyuki, Otani Shigeki	4. 巻 211
2. 論文標題 Plastic deformation of single crystals of CrB ₂ , TiB ₂ and ZrB ₂ with the hexagonal AlB ₂ structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 116857 ~ 116857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2021.116857	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

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 14265 ~ 14265
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 ~ 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 ~ 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 Chen Zhenghao, Inui Haruyuki	4. 巻 208
2. 論文標題 Micropillar compression deformation of single crystals of Fe ₃ Ge with the L12 structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 116779 ~ 116779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2021.116779	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 Hashizume Yukichika, Inomoto Masahiro, Okamoto Norihiko L., Takebayashi Hiroshi, Inui Haruyuki	4. 巻 199
2. 論文標題 Micropillar compression deformation of single crystals of the intermetallic compound -Fe ₄ Zn ₉	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 514 ~ 522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2020.08.062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

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 17983-17983
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 Hashizume Yukichika, Inomoto Masahiro, Okamoto Norihiko L., Inui Haruyuki	4. 巻 136
2. 論文標題 Plastic deformation of single crystals of the 1p and 1k intermetallic compounds in the Fe-Zn system by micropillar compression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Plasticity	6. 最初と最後の頁 102889 ~ 102889
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijplas.2020.102889	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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 $\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ 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 Zhu Chuan Qi, Yamamoto Jimpei, Koizumi Yuichiro, Yuge Koretaka, Kishida Kyosuke, Inui Haruyuki	4. 巻 1016
2. 論文標題 Comprehensive Phase Field Study on Directionally-Solidified $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ Eutectic Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 749 ~ 754
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.749	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inoue Koji, Yoshida Kenta, Nagai Yasuyoshi, Kishida Kyosuke, Inui Haruyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Correlative atom probe tomography and scanning transmission electron microscopy reveal growth sequence of LPSO phase in Mg alloy containing Al and Gd	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 3073-3073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-82705-3	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 Zhu Chuanqi, Koizumi Yuichiro, Chiba Akihiko, Yuge Koretaka, Kishida Kyosuke, Inui Haruyuki	4. 巻 116
2. 論文標題 Pattern formation mechanism of directionally-solidified $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ eutectic by phase-field simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Intermetallics	6. 最初と最後の頁 106590 ~ 106590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.intermet.2019.106590	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kishida Kyosuke, Shinkai Yasuharu, Inui Haruyuki	4. 巻 187
2. 論文標題 Room temperature deformation of 6H-SiC single crystals investigated by micropillar compression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 19 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2020.01.027	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, Gao Si, Mao Wenqi, Bai Yu, Zheng Ruixiao, Du Jun-Ping	4. 巻 181
2. 論文標題 Strategy for managing both high strength and large ductility in structural materials-sequential nucleation of different deformation modes based on a concept of plaston	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 35 ~ 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2020.02.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計52件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Zhenghao Chen
2. 発表標題 Compressive deformation of L12-Fe3Ge micropillar single-crystal
3. 学会等名 THERMEC '2021 (Virtual) (国際学会)
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 THERMEC '2021 (Virtual) (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 (オンライン開催)
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 Mg-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 (オンライン開催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陳 正昊, Yao Hongwei, 乾 晴行
2. 発表標題 / ' 二相組織を有するFe-Ni-Ge 系ハイエントロピー超合金への挑戦
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期 (第169回) 講演大会 (オンライン開催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirotaka Suzuki, Masaomi Okutani, Kyosuke Kishida, Haruyuki 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(Bad Staffelstein, Germany) (online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhenghao Chen, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Micropillar compression deformation of single crystal of Fe ₃ Ge with the L1 ₂ structure
3. 学会等名 Intermetallics 2021(Bad Staffelstein, Germany) (online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陳 正昊, 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 L1 ₂ -Co ₃ (Al,W) の降伏応力の逆温度依存性に及ぼす添加元素の影響
3. 学会等名 日本金属学会2022年春期(第170回)講演大会(オンライン開催)
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年春期(第170回)講演大会(オンライン開催)
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年春期(第170回)講演大会(オンライン開催)
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(オンライン開催)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 乾 晴行
2. 発表標題 脆性硬質材料の低温変形能
3. 学会等名 日本金属学会2022年春季(第170回)講演大会(オンライン開催)(招待講演)
4. 発表年 2022年

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年秋季(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年秋季(第167回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 濱田鉄也, 新津甲大, 乾 晴行
2. 発表標題 -Fe ₂ Al ₅ 規則相の相平衡と結晶構造
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 セメントナ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 Haruyuki Inui
2. 発表標題 Single-crystal mechanical properties of equiatomic and non-equiatomic high-entropy alloys of the Cr-Mn-Fe-Co-Ni system
3. 学会等名 International Conference on High-Entropy Materials 2020 (ICHEM2020) (招待講演) (国際学会)
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 Tetsuya Hamada, Ryutaro Sakai, Kodai Niitsu, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Phase Equilibria and Crystal Structures of Highly Ordered Intermetallic Compounds of Fe ₂ Al ₅ Phases with the Framework Structure of -Fe ₂ Al ₅ Phase
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 Shutaro Matsuura, Kyosuke Kishida, Kodai Niitsu, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Plastic Deformation Behavior of a Ti-Zr-Nb-Hf-Ta Equiatomic Solid Solution Alloy
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 Haruyuki Inui
2. 発表標題 Deformation twinning in FCC high- and medium-entropy alloys
3. 学会等名 TMS 2021 Annual Meeting (招待講演) (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 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 陳 正昊、岡本 範彦、乾 晴行
2. 発表標題 マイクロピラー単結晶L12-Fe3Geの塑性変形
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 乾晴行
2. 発表標題 ナノ・メゾ構造を制御した先進構造材料の創成
3. 学会等名 第60回本多記念賞、第16回本多フテリア賞および第40回本多記念研究奨励賞 贈呈式ならびに記念講演(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaomi Okutani, Nobuyuki Kadota, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Micropillar compression of single crystals of Fe-Cr sigma phase
3. 学会等名 Beyond Nickel-Based Superalloys III (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosei Takeda, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Influences of growth conditions on microstructures and mechanical properties of directionally solidified MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ -based eutectic composites
3. 学会等名 Beyond Nickel-Based Superalloys III (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Development of MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ -based in-situ composites for ultra-high temperature applications
3. 学会等名 Beyond Nickel-Based Superalloys III (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 乾晴行
2. 発表標題 MoSi ₂ 基Brittle/Brittle複相単結晶超耐熱材料の開発
3. 学会等名 2019 ALCA・未来公開シンポジウム - 社会実装に向けた耐熱・軽量材料の開発 - (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸田 恭輔
2. 発表標題 単結晶マイクロピラー圧縮試験で探る層状化合物の塑性変形機構
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2019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相単結晶マイクロピラーのa軸圧縮変形
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田康誠、岸田恭輔、乾晴行
2. 発表標題 MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ 共晶一方向凝固材の微細組織と力学特性に及ぼす凝固条件の影響
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱田鉄也、境龍太郎、新津甲大、乾 晴行
2. 発表標題 -Fe ₂ Al ₅ の高次規則相と相平衡
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥谷将臣、岸田恭輔、乾晴行
2. 発表標題 Fe-Cr系 相単結晶マイクロピラーの転位組織観察
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦周太郎、岸田恭輔、新津甲大、乾 晴行
2. 発表標題 Ti-Zr-Nb-Hf-Ta等原子量合金のすべり面解析
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 乾晴行
2. 発表標題 構造材料研究における量子ビームの利用
3. 学会等名 第6回 大型実験施設とスーパーコンピュータとの連携利用シンポジウム - 物質構造の階層性とフォノン物性の理解 - (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 乾晴行
2. 発表標題 難変形材料におけるプラストン活性化-マイクロ力学試験からのアプローチ-
3. 学会等名 京都大学 構造材料元素戦略研究拠点公開講演会 「構造材料のブレークスルーをめざして ~わが国の基礎研究の挑戦~」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kyosuke Kishida
2. 発表標題 Room-temperature deformation behavior of D81-type transition-metal silicides investigated by micropillar compression
3. 学会等名 Intermetallics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaomi Okutani
2. 発表標題 Plastic deformation behavior of single crystals of Fe-Cr sigma phase at room temperature
3. 学会等名 Intermetallics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosei Takeda
2. 発表標題 Microstructure optimization of directionally solidified MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ eutectic composites
3. 学会等名 Intermetallics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kouhei Ohkage
2. 発表標題 Intermetallics 2019
3. 学会等名 Early stage phenomena of kink formation in the Mg-Zn-Y LPSO phase investigated by micropillar compression (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kyosuke KISHIDA, Haruyuki INUI
2. 発表標題 Room Temperature Deformation Behavior of Hard Intermetallic Compounds Investigated by Micropillar Compression Method
3. 学会等名 MATERIALS RESEARCH MEETING 2019(MRM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱田 鉄也、境 龍太郎、新津 甲大、乾 晴行
2. 発表標題 -Fe ₂ Al ₅ の高次規則相の結晶構造と相平衡
3. 学会等名 日本金属学会2020年春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦 周太郎、岸田 恭輔、新津 甲大、乾 晴行
2. 発表標題 Ti-Zr-Nb-Hf-Ta等原子量合金の低温圧縮変形挙動
3. 学会等名 日本金属学会2020年春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王 小豊、陳 正昊、新津 甲大、岸田 恭輔、乾 晴行
2. 発表標題 -Fe ₂ Al ₅ 単結晶マイクロピラーの塑性変形と変形組織観察
3. 学会等名 日本金属学会2020年春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸田 恭輔、乾 晴行
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本金属学会2020年春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2019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相単結晶マイクロピラー圧縮試験におけるキンク帯形成条件
3. 学会等名 日本金属学会2020年春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上村 遙、武田 康誠、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2020年春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Isao Tanaka , Nobuhiro Tsuji, Haruyuki Inui	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 286
3. 書名 The Plaston Concept: Plastic Deformation in Structural Materials	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学 大学院工学研究科材料工学専攻 乾研究室ホームページ http://imc.mtl.kyoto-u.ac.jp</p>
--

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
研究 分 担 者	岸田 恭輔 (KISHIDA KYOSUKE) (20354178)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

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			
米国	オークリッジ国立研究所	ペンシルバニア大学	オハイオ州立大学	
ドイツ	ルール大学ボッフム校	アーヘン工科大学		
フランス	パリ東大学			
スイス	ローザンヌ工科大学			
韓国	浦頂工科大学			