

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02300

研究課題名(和文) 硬質脆性材料の低温変形能 - 微小体積変形試験から導き出す新規な材料物性

研究課題名(英文) Low-temperature deformability of brittle hard materials - new mechanical properties deduced from experiments with small-volume specimens

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) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロピラー圧縮試験から、バルクでは全く変形能を示さない脆性硬質材料における低温変形能の解明を行った。低温変形能の発現をSiC、数種のMSi₂系およびM₅Si₃系遷移金属シリサイドに加え、鉄鋼材料の脆化相であるシグマ相金属間化合物で見出した。しかし、B₄C、Al₂O₃などのセラミックでは脆性的に破断が生じる。試料サイズが小さくなるほどより大きな応力がかかり、転位の活性化応力に近づくが、破壊靱性が高くなければ、転位の活性化応力に到達する前に破断が生じる。本質的には、破壊靱性値が大きいほど塑性変形に許容される予亀裂の臨界サイズが小さくなり、低温変形能が発現しやすくなる。

研究成果の概要(英文)：Low-temperature deformability has been investigated for brittle hard materials that do not exhibit deformability at ambient temperature in the bulk form, by means of micropillar compression testing. Low-temperature deformability is observed for SiC, some MSi₂-type and M₅Si₃-type transition-metal silicides as well as for a sigma-phase intermetallic, an embrittlement phase in steels. But this was not the case for some ceramics such as B₄C and Al₂O₃. As the specimen size decreases, the stress exerted to the specimen approaches to the stress necessary to generate dislocations. But, if the fracture toughness is not sufficiently high, failure occurs before the stress reaches the level for dislocation generation. The low-temperature deformability is concluded to occur more easily for brittle hard materials with higher fracture toughness because of the smaller critical notch size.

研究分野：材料物性

キーワード：協調的原子集団励起 成収縮転位 プラストン マイクロピラー 試験片サイズ依存性 臨界体積 破壊靱性 核生

1. 研究開始当初の背景

硬質材料は、非常に高い強度をもち、複合材料の強化相のみならず、それ自身も超高温材料として期待されている。SiC や遷移金属シリサイドなどがその代表例であるが、実用上の問題はその脆さにある。現実にはこれらの硬質材料の変形開始温度は 1000°C 近傍にも達する 경우가多く、それ以下では変形能を全く示さない。これは、このような材料における転位運動がパイエルス機構に支配され、変形に熱活性化過程が必要なためである。しかし、最近の我々のマイクロピラー試験片を用いた研究から、硬質材料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でき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、6H 多形の SiC 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 1000°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。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、バルクの高温度変形で底面 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。このような核生成臨界体積内では原子が協調的励起を受けている可能性が高く、その臨界体積は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片によってはじめて実験的に評価できる可能性が高く、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「脆性硬質材料の低温変形能」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べく、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、SiC などの構造用セラミックスや MoSi₂ などの遷移金属シリサイド単結晶を用いて、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「脆性硬質材料の低温変形能」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。「脆性硬質材料の低温変形能」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、SiC に加えバルクでの変形開始温度が系統的に変化する遷移金属シリサイド (MSi₂ 型および M₅Si₃) 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、TEM, SEM, 放射光実験設備にマイクロピラー変形治具を組み込んだ動的マイクロピラー変形実験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、プラストン、つまり「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 (SiC を除いて光学式浮遊溶解装置 (現有) で育成) 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 300nm~10 μm 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 $c = 1/2d$ になれば破断が起こるとすると、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, 現時点でマイクロ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

$6H\text{-SiC}$ 単結晶をバルクでの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 4GPa 程度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である. 底面すべりが活性化しない六方晶 a 軸方向から圧縮しても, マイクロピラー試験片では室温でも 8GPa 程度の非常に高い CRSS を伴って柱面 a すべりの活動により変形能が生じた. その CRSS は, 試験片サイズをサブマイクロオーダーまで小さくしても, 殆ど試験片サイズに依存せず一定値を示す. 遷移金属シリサイドでも同様に低温変形能が観察されたが, CRSS にはわずかながら試験片サイズ依存が見られた. これらの事実は, 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) で働き, 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の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.

Mo_5SiB_2 は新規な超高温材料として期待されている Mo 基合金の強化相であるが, 単結晶 (正方晶) でも 1400°C 以下では全く塑性変形能を示さず, その活動すべり系や臨界分解せん断応力 (CRSS) などは全く不明である. 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, 広範囲の結晶方位範囲で $2\sim 4\text{GPa}$ 程度の非常に高い CRSS を伴って室温でも変形が可能であり, $\{001\}\langle 100\rangle$ すべり, $\{110\}\langle 110\rangle$ すべり, $\{011\}\langle 111\rangle$ すべりの活動が観察された. 透過電子顕微鏡観察により, $\{001\}$ 面上の $\langle 100\rangle$ 転位および $\{110\}$ 面上の $\langle 110\rangle$ 転位が2本の部分転位に分解して運動すること, $\{011\}$ 面上の $\langle 111\rangle$ 転位は部分転位に分解することなく完全転位として運動することが明らかとなった. これらの結果は, 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と良い一致を示した.

M_5Si_3 型遷移金属シリサイドの多くは 2000 度を越える融点を持ち, 超高温構造材料として期待されている. 大別すると 3 種の結晶構造をもつ. 正方晶系 D8l , D8m 型, 六方晶系 D88 型構造である. その代表的化合物として Nb_5Si_3 , Mo_5Si_3 , Ti_5Si_3 を選定し, 供試材とした. いずれの化合物もバルクでは 1400°C 以下では全く塑性変形能を示さず, その活動すべり系や臨界分解せん断応力 (CRSS) などは全く不明である. 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, Nb_5Si_3 が $\{001\}\langle 100\rangle$ すべりで, Ti_5Si_3 が $\{1011\}\langle 2113\rangle$ すべりで非常に高い CRSS を伴って室温でも変形が可能であった. しかし, Mo_5Si_3 ではマイクロピラー試験片でも塑性変形

は可能ではなかった. 本年度に確立したマイクロビーム法で破壊靱性を測定すると前 2 者は破壊靱性が $2\text{MPam}^{1/2}$ を越えていたが, 後者は $0.75\text{MPam}^{1/2}$ しかなく, 低温変形能の発現には破壊靱性が $2\text{MPam}^{1/2}$ を越える必要が明らかとなった.

マイクロサイズの微小体積で破壊靱性を測定するマイクロビーム法の開発を完成させ, 種々の硬質材料に適用し, 破壊靱性の測定を行った. その結果として, 硬質脆性材料において「低温変形能」が発現するには, 破壊靱性がある臨界値を超える必要があることが明らかになり, 本質的には塑性変形に許容される予亀裂のサイズが破壊靱性値に依存し, 破壊靱性値が大きいほど予亀裂の臨界サイズが小さくなり, 低温変形能が発現しやすくなることが突き止められた. 低温変形能の発現を SiC , 数種の MSi_2 系 (MoSi_2 , CrSi_2 , VSi_2 , NbSi_2 , TaSi_2 , TiSi_2) 遷移金属シリサイドおよび M_5Si_3 系 (Mo_5Si_3 , Cr_5Si_3 , Nb_5Si_3) 遷移金属シリサイドに加えて, 鉄鋼材料における脆化相であるラーベス相, シグマ相の金属間化合物でも見出している. 更に, バルクの高温変形で得られた CRSS の温度依存性の延長線上に低温変形能の CRSS がプロットできる場合, 高温バルクと低温ピラーで同一の変形メカニズムが作動していることを透過電子顕微鏡法を駆使して解明できた.

SiC をはじめとして多くの遷移金属シリサイドで低温変形能の発現を確認した. また, 鉄鋼材料における脆化相であるラーベス相, シグマ相金属間化合物でもこれを見出しており, この現象の一般性を更に確認したい. しかし, すべての硬質脆性材料に必ず低温変形能を発現するわけではなく, B_4C , Al_2O_3 などのセラミックで低温変形能の発現はまったく脆性的に破断が生じる. 試料サイズが小さくなるほどより大きな応力がかかり, 転位の活性化応力に近づくが, 破壊靱性が高くなければ, 転位の活性化応力に到達する前に破断が生じるためと考えられる. 本質的には, 破壊靱性値が大きいほど塑性変形に許容される予亀裂の臨界サイズが小さくなり, 低温変形能が発現しやすくなる. 今後はこの低温変形能の発現に関する知見を活用して, 鉄鋼材料における脆化相であるラーベス相, シグマ相などの低温変形能を示す金属間化合物について更に研究を進め, 鉄鋼材料においてこれらの硬質相が, 脆化に繋がらず強化にのみ繋がるような方策の確立に繋げて行きたい.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

1. Haruyuki Inui, Norihiko L. Okamoto, and Shu Yamaguchi, Crystal Structures and Mechanical Properties of Fe-Zn Intermetallic Compounds Formed in the Coating Layer of Galvannealed Steels, ISIJ International, 査読有, Vol.58(2018).

2. Norihiko L. Okamoto, Shota Michishita, Yukichika Hashizume, and Haruyuki Inui, Fracture Toughness of the Fe-Zn Intermetallic Compounds Measured by Bend Testing of Chevron-Notched Single-Crystal Microbeams, *ISIJ International*, 査読有, Vol.58(2018).
3. Norihiko L. Okamoto, Masahiro Inomoto, Hiroshi Takebayashi, Haruyuki Inui, Crystal structure refinement of the Γ - and Γ_1 -phase compounds in the Fe-Zn system and orientation relationships among α -Fe, Γ and Γ_1 phases in the coating layer of galvanized steel, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.732(2017),52-63. DOI:10.1016/j.jallcom.2017.10.146
4. Haruyuki Inui, Norihiko L. Okamoto, Crystal Structure and Mechanical Properties of Intermetallic Compounds in the Fe-Zn system in the Coat Layer of Galvanized Steel, *Proceedings of 11th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet(Galvatech 2017)*, (2017), 6-10.
5. Norihiko L. Okamoto, Yukichika Hashizume, Shota Michishita, Haruyuki Inui, Plastic Deformation and Fracture Behavior of Single Crystals of the Intermetallic Compounds in the Fe-Zn System, *Proceedings of 11th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet(Galvatech 2017)*,(2017), 200-203.
6. Yukichika Hashizume, Norihiko L. Okamoto, Haruyuki Inui, Microscale Deformation of the Γ AND δ IP Phases in the Fe-Zn System, *Proceedings of 11th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet(Galvatech 2017)*, (2017), 981-985.
7. Kabir Arora, Kyosuke Kishida, Katsushi Tanaka, Haruyuki Inui, Effects of lattice misfit on plastic deformation behavior of single-crystalline micropillars of Ni-based superalloys, *Acta Materialia*, Vol. 138(2017), 119-130. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.07.044
8. Norihiko L. Okamoto, Shohei Takemoto, Zhenghao M.T. Chen, Masatake Yamaguchi, Haruyuki Inui, FCC metal-like deformation behaviour of Ir 3 Nb with the L1 2 structure, *International Journal of Plasticity*, Vol.97(2017),145-158. DOI: 10.1016/j.ijplas.2017.05.013
9. Jinyu Zhang, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui, Specimen size and shape dependent yield strength in micropillar compression deformation of Mo single crystals, *International Journal of Plasticity*, Vol.92(2017), 45-56. DOI: 10.1016/j.ijplas.2017.02.014
10. Norihiko L. Okamoto, Jumpei Okumura, Masaya Higashi, and Haruyuki Inui, Crystal Structure of η' -Fe₃Al₈; Low-Temperature Phase of η -Fe₂Al₅ Accompanied by an Ordered Arrangement of Al Atoms of Full Occupancy in the C-axis Chain Sites, *Acta Materialia*, Vol. 129(2017), 290–299. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.02.060
11. Norihiko L. Okamoto, Koretaka Yuge, Katsushi Tanaka, Haruyuki Inui, and Easo P. George, Atomic displacement in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy – A scaling factor to predict solid solution strengthening, *AIP Advances*, Vol.6(2016), 125008. DOI: 10.1063/1.4971371
12. Norihiko L. Okamoto, Shu Fujimoto, Yuki Kambara, Marino Kawamura, Zhenghao M. T. Chen, Hirotaka Matsunoshita, Katsushi Tanaka, Haruyuki Inui and Easo P. George, Size effect, critical resolved shear stress, stacking fault energy, and solid solution strengthening in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy, *Scientific Reports*, Vol.6(2016), 35863. DOI: 10.1038/srep35863
13. Hirotaka Matsunoshita, Yuta Sasai, Kosuke Fujiwara, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui, Plastic deformation of directionally solidified ingots of binary and some ternary MoSi₂/Mo₅Si₃ eutectic composites, *Science and Technology of Advanced Materials*, vol.17, 1(2016), 517-529. DOI: 10.1080/14686996.2016.1218248
14. Hirotaka Matsunoshita, Kosuke Fujiwara, Yuta Sasai, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui, Orientation relationships, interface structures, and mechanical properties of directionally solidified MoSi₂/Mo₅Si₃/Mo₅Si₃C composites, *Intermetallics*, Vol.73(2016),12–20. DOI: 10.1016/j.intermet.2016.02.005
15. V. Paidar, M. Cak, M. Sob and H. Inui, What Types of Stacking Faults and Dislocation Dissociations Can Be Found in Transition-Metal Disilicides, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 128 , 4(2015), 589-591. DOI: 10.12693/APhysPolA.128.589.
16. Toshihiro Yamazaki, Yuichiro Koizumi, Koretaka Yuge, Akihiko Chiba, Koji Hagihara, Takayoshi Nakano, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui, Mechanisms of lamellar structure formation and Cr interfacial segregation in C11b-MoSi₂/C40-NbSi₂ dual phase silicide verified by a phase-field simulation incorporating elastic inhomogeneity, *Computational Materials Science*, Vol.108, PartB(2015), 358-366. DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.04.018
17. V. Paidar and H. Inui, Why the slip of 1/2<331> dislocations on {013} in C11b behaves differently at low and high temperatures ?, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.632(2015) , 44-47.

DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.01.154

18. H. Inui and N.L. Okamoto, What Controls Temperature Dependence of Yield Stress in L12-Ordered Intermetallic Compounds, MRS Symp. Proc. Vol.1760(2015),1-11.
DOI: 10.1557/opl.2015.27
19. H. Matsunoshita, K. Fujiwara, Y. Sasai, Y. Kondo, K.Kisida and H. Inui, Microstructures and Mechanical Properties of MoSi₂/ Mo₅Si₃ / Mo₅Si₃C Ternary Eutectic Composite, MRS Symp. Proc., Vol.1760(2015),1-6.
DOI: 10.1557/opl.2015.116

[学会発表] (計 74 件)

1. 岸田恭輔, マイクロピラー圧縮試験による変形機構解析, 日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会, 2018 年 3 月 19 日-21 日, 千葉工業大学 新習志野キャンパス.
2. Vega Farje Juan Antonio, 神原佑季, 松野下裕貴, 岸田恭輔, 乾晴行, Mechanical properties of directionally solidified MoSi₂-Mo₅Si₃ eutectic alloys with ternary and quaternary additions, 日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会, 2018 年 3 月 19 日-21 日, 千葉工業大学 新習志野キャンパス.
3. 門田信幸, 岡本範彦, 岸田恭輔, 乾晴行, Wei CHEN, Peng ZHOU, セメントタイト単結晶のマイクロピラー圧縮変形, 日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会, 2018 年 3 月 19 日-21 日, 千葉工業大学 新習志野キャンパス.
4. 東雅也, 新津甲大, 乾晴行, 溶融 Zn-Al めっき鋼板の浸漬時における金属間化合物層の組織変化, 日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会, 2018 年 3 月 19 日-21 日, 千葉工業大学 新習志野キャンパス.
5. 境龍太郎, 東雅也, 新津甲大, 乾晴行, Al 過剰組成の η -Fe₂Al₅ 相に現れる高次規則相の結晶構造解析, 日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会, 2018 年 3 月 19 日-21 日, 千葉工業大学 新習志野キャンパス.
6. 東雅也, 境龍太郎, 奥村純平, 〇新津甲大, 乾晴行, η -Fe₂Al₅ 相における高次規則構造の多様性, 日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会, 2018 年 3 月 19 日-21 日, 千葉工業大学 新習志野キャンパス.
7. 奥谷将臣, 門田信幸, 新津甲大, 岸田恭輔, 乾晴行, Fe-Cr 系 σ 相の単結晶マイクロピラー圧縮変形, 日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会, 2018 年 3 月 19 日-21 日, 千葉工業大学 新習志野キャンパス.
8. 武田康誠, 神原佑季, 松野下裕貴, 岸田恭輔, 乾晴行, MoSi₂/Mo₅Si₃/Mo₅Si₃C 共晶合金の組織と力学特性に及ぼす添加元素の影響, 日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会, 2018 年 3 月 19 日-21 日, 千葉工業大学 新習志野キャンパス.
9. Nobuyuki Kadota, Haruyuki Inui, Norihiko Okamoto, Isao Tanaka, You Zhou, Hideki Hyuga, Kiyoshi Hirao, Compression Testing of Single Crystals of β -Si₃N₄ on Micron Meter Scale by Means of FIB Machining Combined with EBSD Orientation Mapping, TMS 2018 Annual Meeting & Exhibition, Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona, 2018 年 3 月 11 日-15 日.
10. Kyosuke Kishida, Micropillar compression of intermetallic compounds with complex crystal structures, 6th ESISM Workshop in Kyoto "Fundamental Issues of Structural Materials", 京都大学 楽友会館, 2018 年 2 月 28 日.
11. SU YI, Kyosuke KISHIDA, Haruyuki INUI, The effects of Ni concentration on deformation behavior of (Fe, Ni)₂Nb ternary Laves phase, 社団法人日本鉄鋼協会・公益社団法人日本金属学会 関西支部 材料物性工学談話会平成 29 年度第 2 回講演会ならびにポスター発表会, 大阪大学 中之島センター, 2018 年 1 月 26 日.
12. Vega Fane Juan Antoni, 神原佑季, 松野下裕貴, 岸田恭輔, 乾晴行, Microstructure of laser surface melted MoSi₂-Mo₅Si₃ eutectic composites, 社団法人日本鉄鋼協会・公益社団法人日本金属学会 関西支部 材料物性工学談話会平成 29 年度第 2 回講演会ならびにポスター発表会, 大阪大学 中之島センター, 2018 年 1 月 26 日.
13. 東雅也, 桃野将伍, 岸田恭輔, 岡本範彦, 乾晴行, MAX 相 Ti₃SiC₂ の単結晶マイクロピラー圧縮変形挙動, 社団法人日本鉄鋼協会・公益社団法人日本金属学会 関西支部 材料物性工学談話会平成 29 年度第 2 回講演会ならびにポスター発表会, 大阪大学 中之島センター, 2018 年 1 月 26 日.
14. 橋爪志周, 岡本範彦, 乾晴行, Fe-Zn 系金属間化合物 Γ 相及び δ 1P 相の塑性変形, 社団法人日本鉄鋼協会・公益社団法人日本金属学会 関西支部 材料物性工学談話会平成 29 年度第 2 回講演会ならびにポスター発表会, 大阪大学 中之島センター, 2018 年 1 月 26 日.
15. KIM JINGEUM, 長榮忠成, 岸田恭輔, 乾晴行, HCP Ti 単結晶マイクロピラーの圧縮変形挙動, 社団法人日本鉄鋼協会・公益社団法人日本金属学会 関西支部 材料物性工学談話会平成 29 年度第 2 回講演会ならびにポスター発表会, 大阪大学 中之島センター, 2018 年 1 月 26 日.
16. 福山貴義, 丸山拓仁, 岸田恭輔, 乾晴行, D81 型 MO₅Si₂ 単結晶のマイクロピラー圧縮変形, 社団法人日本鉄鋼協会・公益社団法人日本金属学会 関西支部 材料物性工学談話会平成 29 年度第 2 回講演会ならびにポスター発表会, 大阪大学 中之島センター, 2018 年 1 月 26 日.
17. 神原佑季, 松野下裕貴, 岸田恭輔, 乾晴行, MO₅Si₂/Mo₅Si₃ 共晶合金の微細組織・界面

- 構造と力学特性に及ぼす添加元素の影響, 社団法人日本鉄鋼協会・公益社団法人日本金属学会 関西支部 材料物性工学談話会 平成 29 年度第 2 回講演会ならびにポスター発表会, 大阪大学 中之島センター, 2018 年 1 月 26 日.
18. Haruyuki Inui, Norihiko L. Okamoto, Crystal Structure and Mechanical Properties of Intermetallic Compounds in the Fe-Zn System in the Coat Layer of Galvanized Steel, GALVATECH 2017, The University of Tokyo, 2017 年 11 月 12 日-16 日.
 19. Yukichika Hashizume, Norihiko L. Okamoto, Haruyuki Inui, Microscale Deformation of the Γ and δ 1P Phases in the Fe-Zn System, 1, GALVATECH 2017, The University of Tokyo, 2017 年 11 月 12 日-16 日.
 20. Norihiko L. Okamoto, Yukichika Hashizume, Shota Michishita, Haruyuki Inui, Plastic Deformation and Fracture Behavior of Single Crystals of the Intermetallic Compounds in the Fe-Zn System, GALVATECH 2017, The University of Tokyo, 2017 年 11 月 12 日-16 日.
 21. Haruyuki Inui, Ambient-Temperature Plasticity of Brittle Intermetallics at Micron-Meter Size Scales, Intermetallics 2017, Bad Staffelstein, Germany, 2017 年 10 月 2 日-10 月 6 日.
 22. 乾晴行, η -Fe₂Al₅ における結晶構造の多様性と固溶範囲, 日本鉄鋼協会 表面処理鋼板部会 第 4 回「高機能溶融亜鉛めっき皮膜創成とナノ解析研究会」, 北海道大学, 2017 年 9 月 9 日.
 23. 金振謙, 長榮忠成, 岸田恭輔, 乾晴行, HCPTi 単結晶マイクロピラーの圧縮変形挙動, 日本金属学会 2017 年秋期(第 161 回) 講演大会, 北海道大学, 2017 年 9 月 6 日-9 月 8 日.
 24. 門田信幸, 岡本範彦, 乾晴行, 田中功, 周游, 日向秀樹, 平尾喜代司, Si₃N₄ の室温における転位運動と力学特性, 日本金属学会 2017 年秋期(第 161 回) 講演大会, 北海道大学, 2017 年 9 月 6 日-9 月 8 日.
 25. 神原佑季, 松野下裕貴, 岸田恭輔, 乾晴行, MoSi₂/Mo₅Si₃ 共晶一方向凝固材の力学特性に及ぼす複合元素添加の影響, 日本金属学会 2017 年秋期(第 161 回) 講演大会, 北海道大学, 2017 年 9 月 6 日-9 月 8 日.
 26. 東雅也, 岡本範彦, 乾晴行, η -Fe₂Al₅ 相における部分占有 Al サイトの占有挙動の組成依存, 日本金属学会 2017 年秋期(第 161 回) 講演大会, 北海道大学, 2017 年 9 月 6 日-9 月 8 日.
 27. 橋爪志周, 岡本範彦, 乾晴行, Fe-Zn 系金属間化合物 Γ 及び δ 1p 相の塑性変形, 日本金属学会 2017 年秋期(第 161 回) 講演大会, 北海道大学, 2017 年 9 月 6 日-9 月 8 日.
 28. 福山貴義, 丸山拓仁, 岸田恭輔, 乾晴行, D81 型 Mo₅SiB₂ (T2 相) 単結晶マイクロピラーの室温圧縮変形, 日本金属学会 2017 年秋期(第 161 回) 講演大会, 北海道大学, 2017 年 9 月 6 日-9 月 8 日.
 29. 岡本範彦, GA 鋼板のめっき被膜を構成する Fe-Zn(-Al)系金属間化合物の結晶構造解析, 日本金属学会 2017 年秋期(第 161 回) 講演大会, 北海道大学, 2017 年 9 月 6 日-9 月 8 日.
 30. 門田信幸, 岡本範彦, 乾晴行, 田中功, 周游, 日向秀樹, 平尾喜代司, β -Si₃N₄ 単結晶のマイクロピラー圧縮試験, 日本金属学会 2017 年春期(第 160 回) 講演大会, 首都大学東京 南大沢キャンパス, 2017 年 3 月 15 日-3 月 17 日.
 31. Wei CHEN, Peng ZHOU, Norihiko L. OKAMOTO, Haruyuki INUI, Micropillar compression deformation of Fe₃C single crystals, 日本金属学会 2017 年春期(第 160 回) 講演大会, 首都大学東京 南大沢キャンパス, 2017 年 3 月 15 日-3 月 17 日.
 32. 橋爪志周, 道下勝太, 岡本範彦, 乾晴行, Fe-Zn 系金属間化合物 Γ 相単結晶の塑性変形, 日本金属学会 2017 年春期(第 160 回) 講演大会, 首都大学東京 南大沢キャンパス, 2017 年 3 月 15 日-3 月 17 日.
- この他 42 件
- [図書] (計 0 件)
該当なし
- [産業財産権]
○出願状況 (計 0 件)
該当なし
○取得状況 (計 0 件)
該当なし
- [その他]
ホームページ等
<http://imc.mtl.kyoto-u.ac.jp/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
乾 晴行 (INUI HARUYUKI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30213135
 - (2) 研究分担者
岸田 恭輔 (KISHIDA KYOSUKE)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 20354178

岡本 範彦 (OKAMOTO NORIHIKO)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60505692
 - (3) 連携研究者
なし