

平成 21 年 6 月 2 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19360381

研究課題名（和文）ナノ破壊機能を具備したセラミックスバンパーの開発

研究課題名（英文）Development of ceramics bumper with nanofragmentation function

研究代表者

近藤 建一（KONDO KENICHI）

東京工業大学・応用セラミックス研究所・教授

研究者番号：50111670

研究成果の概要：

本研究では、耐スペースデブリ・微小メテオライトシールド性能を高めるために、良質のムライトセラミックスを Whipple バンパー材料として実用に供することを目標としている。各種の飛翔体をバンパー材料に衝突させ、その背後に置かれた検証板上のダメージにより評価した結果、劇的なムライとバンパーの優位性が示された。また、バンパーの破片痕が顕著となる周辺部分では、傷の深さはムライトの場合で圧倒的に小さく、二次ダメージ軽減効果の大きいことが明らかとなった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2008年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
年度			
年度			
年度			
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：宇宙インフラ・航空宇宙工学・セラミックス・ナノ材料・壊れ方機能

1. 研究開始当初の背景

人類の宇宙開発活動が開始されてから、40年以上が経過し、その間、4000回にも上る打ち上げが行われてきた。これまでの宇宙開発ではそれらの使用済み宇宙システムは、そのまま軌道上に放置されてきた。その結果、現在軌道が固定されているおよそ9000個の人工宇宙物体の内、運用されているものは僅か5%であり、残りはスペースデブリ（宇宙ゴミ）である。このスペースデブリ（宇宙ゴミ）の問題は人類の宇宙開発活動の存続を左右しかねない重大かつ深刻な問題なのである。[1-2]。

現在、国際宇宙ステーション（ISS：International Space Station）を日本、アメリカ、ロシア、カナダ、ESA（欧州宇宙機関）が協力して建設を進めている[3]。宇宙デブリの増加は、計画当初から懸念されており、宇宙ステーションとの衝突事故が問題視されていた。このため、宇宙デブリ防護に関して広範で種々の対策が検討されてきた。

Whipple Shield[4]とは与圧モジュールの周囲に1枚のアルミ合金板をバンパーとして取り付けるもので、デブリ衝突確率が高い進行方向に取り付けられた Stuffed Whipple Shield[5]とは防護性能向上のためアルミ合

金板と与圧モジュールの間に2段目バンパーとしてアルミメッシュ、セラミック繊維(Nextel)、アラミド系繊維(Kevlar)から構成されるスタッフィングと呼ぶ多層積層材を配置したバンパーである。

スペースデブリは、人工衛星等の残骸であるアルミニウム合金がその多くを占めており[6]。宇宙構造物に対して甚大な被害を与え得る。安全・安心な宇宙開発を探索する為には、このような脅威からの脱却する手法を確立する事が急務である。

2. 研究の目的

過去、様々な材料に対して、耐スペースデブリ防護性能評価に関する研究は数多く行われてきた。しかしながら、そのほとんどは巨視的破壊のみに着目したものであった。つまり、物質の衝撃応答に対する微視的構造と巨視的破壊の相関は考慮されてこなかった。我々の研究グループでは、古くから耐火材としてよく知られているムライトセラミックス[7-9]が、大きな体積減少を伴う衝撃誘起圧力相転移を起こし、圧力解放後は、ナノスケールの一様で微細なムライト結晶粒子もしくはガラス状粒子となることを見出した[10]。このような微視的な構造変化は巨視的な現象に対して大きな影響を及ぼすものと思われる。

すなわち、相転移による大きなエネルギー吸収や、ナノ微細化に伴うバンパー由来の2次デブリの粉末状化の効果などを利用する事により、理想的な防護バンパー特性を得ることが期待できる。つまり、材料そのものが本質的に持っている相転移という特性を利用して、機能的な破壊を促すのである。

本研究では、高速飛翔体に対するムライトセラミックスの防護特性を評価する事を目的とし、アルミニウム合金やSS400などの金属系材料、また相転移を起こさないアルミナとの性能比較を行う。また、ムライトの相転移に着目した微視的観察により、ムライトのナノ微細化がバンパー特性にどのような影響を及ぼすのかも評価する。

3. 研究の方法

本研究では種々のバンパー材料に対してデブリや氷などを模した高速飛翔体を衝突させ、その背後に置かれた検証板上のダメージを評価することによりバンパー性能を検証する。また、衝突直後のデブリ飛散状況をパルスX線絵影写真により撮影し、衝撃破壊状況の調査を行った。また、検証板上から飛散したムライトバンパー微粒子を採取し、透過型電子顕微鏡による微細組織の観察を行った。

デブリの衝突速度は秒速数キロメートルのオーダーであるから、超高速の発生が必須

である。本研究では水素ガスを使った秒速9.2 kmまで加速可能な二段式軽ガス銃を用いた。飛翔体速度測定は、飛翔体の通過を検出するセンサーをある間隔で設置し、その通過に要した時間から求めた。

4. 研究成果

4.1 高速連鎖衝突によるムライトセラミックスの防護特性評価

飛翔体には、氷のような低密度物質の超高速衝突現象を模擬する為には、氷と密度の近いポリカーボネイトを用い、宇宙構造物の残骸を模擬する為にアルミニウム合金を用いた。

連鎖衝突実験後、検証板を回収し、衝突痕中心を通る一軸上に深さを測定した。本実験では2つのシリーズでの検証を行った。

1. ポリカーボネイト飛翔体を用いたムライトとSS400バンパーでの比較
2. アルミニウム合金飛翔体を用いたムライト、アルミナ、アルミニウム合金の比較

4.1.1 ムライトとSS400の比較

回収した検証板の最大衝突痕深さをデプスマーターによって測定した。バンパー厚さが2 mmの場合の結果をFig. 4.1に示す。

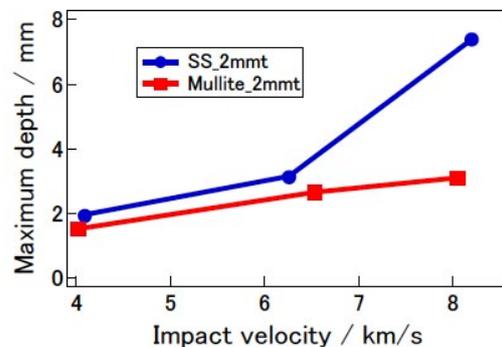


Fig. 4.1 : Maximum depth for the witness plate with 2mm SS- and mullite bumper.

バンパーの厚さが2mmでは突速度が上がる材料の差が顕著に表れており、ムライトセラミックスの防護特性が良好である事が分かる。

材料による差が最も大きく現れたバンパー厚さ2 mm、衝突速度8 km/sの場合のクレーター形状をFig. 4.2とFig. 4.3に示す。これは衝突痕中心を通る1軸上の深さを測定したものである。

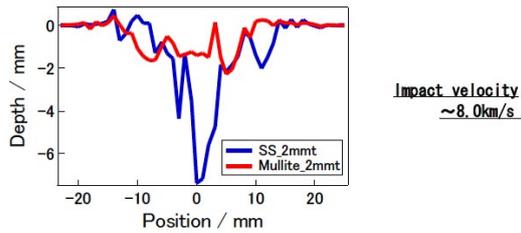


Fig. 4.2 : Depth of the witness plate for with 2mm SS- and mullite bumper when impact velocity is about 8.0km/s.

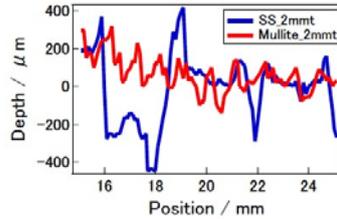


Fig. 4.3 : Magnified view of damage region of second debris from 2mm SS- and mullite bumper when impact velocity is about 8.0km/s.

4.1.2 より宇宙環境に近い条件下でのムライトバンパーの Whipple バンパーとしての性能評価

本節では実際のデブリにより近い条件として、飛翔体にアルミニウムを使った 5.5 km/s 域、および 7.6 km/s 域での連鎖衝突実験を行った。

種々のセラミックス材料とアルミニウム合金を用いた場合の最大衝突痕深さを衝突速度に対してプロットしたものを Fig. 4. 4 に示す。

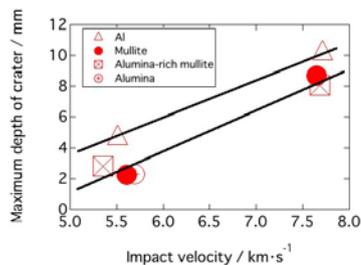


Fig. 4.4: Maximum depth of craters against impact velocity for several bumper materials.

いずれのセラミックスでもアルミニウム合金よりはダメージが少ないものの、セラミックスの種類による顕著な差は認められていない。

ムライトで生じる相転移がバンパー自身の破壊に及ぼす影響を評価するために、バンパー由来による 2 次デブリの衝突痕をムライトとアルミナについて比較した (Fig. 4. 5)。

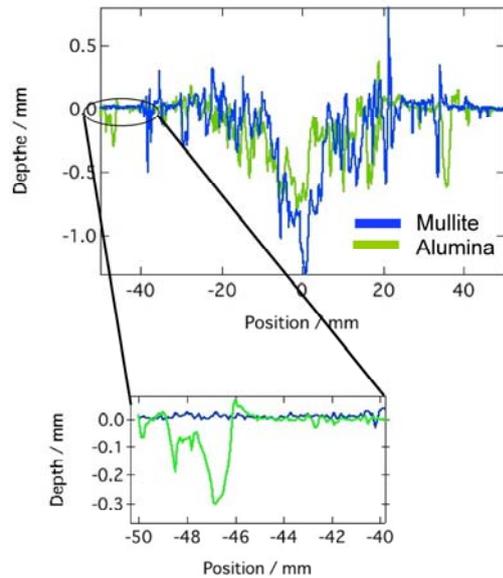


Fig. 4.5 : Depth of the witness plate for with 2mm Alumina and mullite bumper when Al flyer was impacted about 5.5 km/s. Outer region where fragments of bumper materials are dominant shows considerable difference between alumina and mullite bumper.

飛翔体由来の衝突痕には有為な差が見られない。これはバンパーの厚さが飛翔体の厚さに対し薄すぎるため材料特性の差が顕著には現れないためと思われる。一方、バンパー由来の 2 次デブリの影響が主となるその周辺部では明らかな違いがある。ムライトバンパーによる破片のダメージがアルミナバンパーに比較して、きわめて小さくなっている。ムライトと同じセラミックス系材料であり、ムライトとほぼ同等のウゴニオ弾性限界を持つアルミナでは 2 次デブリに対する衝突痕がアルミニウムと同程度である事は極めて興味深い。これはムライトの相転移に伴うナノ微細化が 2 次デブリの微細化に影響を及ぼす事を示唆する結果である。

アルミニウムとムライトによる複合材料によるバンパーの試験も行ったが、アルミニウムバンパーに対して大きな改善は見られなかった。これは、衝突背面のアルミニウムが、通常のアルミニウムバンパーと同じような挙動をした結果と推察できる。

4.2 ムライトセラミックスバンパーの衝撃破砕状況のその場観察

パルス X 線影絵写真にて、厚さ 1mm のアルミニウムバンパーとムライトセラミックスバンパーに飛翔体が衝突し 2 次デブリが飛散する様子を撮影した。それぞれのショットに対し、飛翔体がバンパーに衝突する直前、衝突直後に 2 次デブリが広がっている様子、

という2つの状態を撮影をした。Fig. 4.6 はアルミニウムバンパー、Fig. 4.7はムライトバンパーについての撮影写真である。

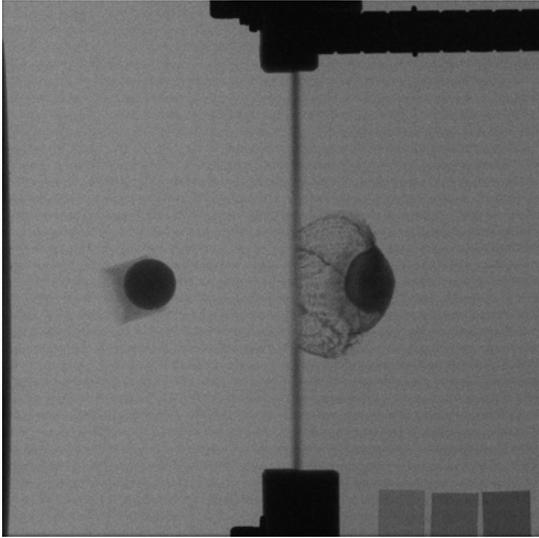


Fig. 4.6 : Projectile $5.7\mu\text{s}$ to impact ago and second debris impact $4.6\mu\text{s}$ later with aluminum bumper 1mm thick (at 5.00km/s) observed by X-ray shadowgraph method.

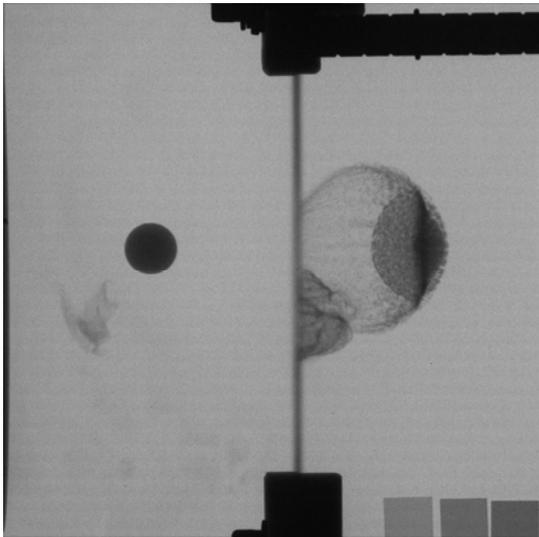


Fig. 4.7: Projectile $5.7\mu\text{s}$ to impact ago and second debris impact $4.6\mu\text{s}$ later with mullite bumper 1mm thick (at 5.00km/s) observed by X-ray shadowgraph method.

バンパー衝突直後の様子を観察すると、いずれも中心部に飛翔体自体の破片が球状に広がり、その回りを覆うようにバンパーの破片が飛散している[11]。2次デブリが放射状に飛散し広がった様子を見てみると、金属材

料であるアルミニウムバンパーの破片は大きいもので数mmのオーダーであるのに対し、一方ムライトセラミックスバンパーの破片は1mm以下であり検証板の結果同様ムライトセラミックスが金属材料と比較しはるかに細かく破壊されている事が分かる。

4.3 衝撃破碎されたムライトセラミックスバンパーの微細組織観察

相転移の影響を考えるために、微視的な情報は不可欠であり、検証板に付着したムライト破片のTEM観察を行った(Fig. 4.8)。

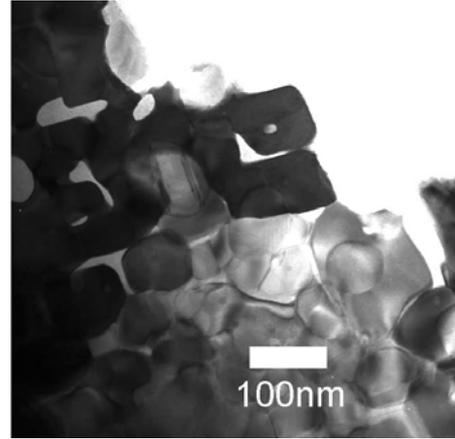


Fig. 4.8 : Magnified view of square portion of Fig. 4.35. Nanocrystals with grain sizes of less than 100nm are dispersed.

衝突速度 6.53km/s の実験から回収したムライトでは、もともとの粒径よりもはるかに小さい数十nmほどに微細化された組織が観察された。これは川合らにより、報告されている衝撃誘起高圧相転移によって生じたナノ微粒子と同様なものと考えられ、バンパー実験のような単発の衝撃圧縮によってもナノ微細化が生じることが明らかとなった。

4.4 総括

本研究では、過酷な環境下での構造材料として期待されるムライトセラミックスの高い衝撃抵抗と衝撃誘起高圧相転移によるナノ微細化という特性を活かし、バンパー材料としての特性を評価する事を目的とした。金属材料、アルミナとムライトセラミックスを比較すべく連鎖衝突実験を行った。その場観察をパルスX線影絵写真撮影にて行い、材料と衝突速度によるバンパー特性評価として回収検証板の衝突痕深さを測定した。さらに透過型電子顕微鏡(TEM)にて破壊されたムライトセラミックス破片の微細構造を観察した。

金属材料(SS400, アルミニウム合金)バンパーとムライトセラミックスバンパーのバ

ンパー特性を比較した場合、衝突痕最大深さは、ムライトセラミックスバンパーを用いる事により大幅に軽減される事が明らかになった。また、バンパー由来の2次デブリによる衝突痕は金属材料バンパーよりもムライトセラミックスバンパーの方が小さく、実際のバンパー素材としての優位性を持つものと考えられる。また、パルスX線影絵写真撮影にてアルミニウムとムライトセラミックスの2次デブリの様子を観察した。いずれの結果からもムライトセラミックスの破片が極めて小さくなっているという事が明らかになった。またムライトと同じセラミックス材料であるアルミナをバンパーとして用いた際の衝突痕深さは金属であるアルミニウムのものと同程度であり、ムライトによるものとは有為な差が見られた。これらの結果はムライトセラミックスバンパーのナノ微細化を示唆するものである。ムライトセラミックスバンパー破片を回収し、透過型顕微鏡にて観察した結果、ナノオーダーの微細化された粒子が数多く観察され、相転移に伴うナノ微細化が生じていることを示唆している。

耐衝撃ムライトバンパーは高いウゴニオ弾性限界(HEL)を有し、衝突物体がバンパーに衝突した際に発生するピーク圧力が30GPaを超える衝撃に対して衝突物体と共にバンパー自体が数十nm以下の微細な粉末に変化する物性を有している事から、宇宙ステーションを防護するバンパーとして有効であるだけでなく、耐衝撃材料としても優れた効果がある事を見出した。

今後の課題としては、バンパー背後の構造物への影響を更に詳細に検証するために、スタンドオフを更に広げ、2次デブリ成分である飛翔体質量とバンパー質量とを更に離間する事により、個別の詳細な解析を行う必要があるものと考えられる。また、衝突角度変化による2次デブリの振る舞いとその背後の構造材料への影響を調べる事も必要であろう。

参考文献

- [1] D. J. Kessler: Adv. Space Res., 11 (1991) 63.
- [2] D. S. F. Portree and J. P. Loftus, Jr: "Orbital Debris: A Chronology" NASA. (1999)
- [3] http://www.nasa.gov/images/content/143942main_ISS_config.jpg
- [4] F. L. Whipple, Meteorites and Space Travel. Astronomical Journal, No1161 (1947) 131.
- [5] E. L. Christiansen, J. L. Crews, J. E. Williamsen, J. H. Robinson, and A. M. Nolen: Int. J. Impact Eng.,

17 (1995) 217.

- [6] <http://oigl.gsfc.nasa.gov>
- [14] H. Tamura and Y. Mutou: Int. J. Impact Eng., 31 (2005) 1192.
- [7] I. A. Aksay, D. M. Dabbs and M. Savikaya: J. Am. Ceram. Soc., 74 (1991) 2343.
- [8] U. Steinhauser, W. Braue, J. Gotring, B. Kanka and H. Schneider: J. Eur. Ceram. Soc., 20 (2000) 651.
- [9] H. Schneider, K. Okada and J. Pask: Mullite and Mullite Ceramics (J. Wiley, New York, 1994).
- [10] N. Kawai, K. G. Nakamura, K. Kondo, J. Appl. Phys. 96 (2004) 4126.
- [11] Frank K. Schaefer: Int. J. Impact Eng., 33 (2006) 745.

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 8件)

- ① N. Kawai, Y. Harada, M. Yokoo, T. Atou, K. G. Nakamura, and K. Kondo, Dynamic Deformation and Fracture of Mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) Ceramics Under Hypervelocity Impact. Int. J. Impact Eng. 35 (2008) 1878-1881、査読有り.
- ② M. Yokoo, N. Kawai, K. G. Nakamura, and K. Kondo, Hugoniot Measurement of Hypervelocity Impact at Velocities up to 9 km/s Using Two-stage Light-gas Gun Under Optimized Shot Conditions, Int. J. Impact Eng., 35 (2008) 1612-1615、査読有り.
- ③ M. Yokoo, N. Kawai, K. G. Nakamura, and K. Kondo, Hugoniot measurement of gold at high pressures of up to 580 GPa, Appl. Phys. Lett, 92 (2008) 051901、査読有り.
- ④ K. Yubuta, T. Hongo, T. Atou, K. G. Nakamura, K. Kondo and M. Kikuchi, Intergrowth microstructures of MnF₂ subjected to by shock compression at 4.4, 9.0 and 21.6 GPa, studied by high-resolution transmission electron microscopy, Philosop. Mag. (2008) 、査読有り.
- ⑤ N. Kawai, T. Atou, S. Ito, K. Yubuta, M. Kikuchi, K. G. Makamura, and K. Kondo, Aligned Nanocrystalline Fragmentation of Mullite under Shock Loading, Advanced Materials, 19 (2007) 2375-2378、査読有り.
- ⑥ K. Yubuta, T. Hongo, T. Atou, K. G. Nakamura, K. Kondo, and M. Kikuchi, High-resolution electron microscopy of microstructure of MnF₂ subjected to shock

compression at 4.4 GPa, Solid State Commun., 143, 127-130 (2007) 、査読有り.

⑦ T. Hongo, K. G. Nakamura, T. Atou, M. Kikuchi, K. Yubuta, S. Itoh, K. Kusaba, K. Fukuoka, and K. Kondo, Phase transition of MnF₂ driven by shock compression at pressure of up to 33 GPa, Phys. Rev. B 76, 104114 (2007) 、査読有り.

⑧ T. Atou, N. Kawai, K. G. Nakamura, K. Kondo, S. Ito, K. Yubuta, M. Kikuchi, TEM observation of disproportionation of mullite and sillimanite under shock compression, AIP Conference Proceedings, Shock Compression of Condensed Matter-2007, eds. M. Elert, M. D. Furnish, R. Chau, N. Holmes, and J. Nguyen, pp. 143 - 146, (2007) 、査読有り.

〔学会発表〕(計 10 件)

① 阿藤敏行、川合伸明、原田陽介、中村一隆、近藤建一、ムライトセラミックスのナノ破壊と Whipple バンパーへの応用、平成 20 年度衝撃波シンポジウム、2009.3.17、名古屋

② 齊藤文一、本田竜二、尾上伸輔、田村英樹、阿藤敏行、近藤建一、軽量セラミックバンパーへの衝突における球形飛翔体の動的破砕、平成 20 年度衝撃波シンポジウム、2009.3.17、名古屋

③ 阿藤敏行、川合伸明、中村一隆、近藤建一、伊藤俊、菊地昌枝、ムライトのナノ微細化に及ぼす組成・構造の効果、第 49 回高圧討論会、2008.11.12、姫路

④ 横尾学、川合伸明、中村一隆、近藤建一、土屋卓久、cubic-BN のウゴニオ測定、第 49 回高圧討論会、2008.11.12、姫路

⑤ 横尾学、川合伸明、中村一隆、近藤建一、土屋卓久、衝撃圧縮データを用いた金の状態方程式の検討、第 49 回高圧討論会、2008.11.12、姫路

⑥ T. Atou, N. Kawai, K. G. Nakamura, K. Kondo, S. Ito, and M. Kikuchi, Mechanism of Peculiar Nano-fragmentation in Mullite Ceramics Induced by Shock Compression, The 2nd International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics, 2008, 6.1, Makuhari, JAPAN.

⑦ 齊藤文一、梅津義孝、尾上伸輔、田村英樹、阿藤敏行、近藤建一、軽量セラミックバンパーからの微細デブリ発生と連鎖衝突損傷、平成 19 年度衝撃波シンポジウム、2008.3.17、東京

⑧ 原田陽介、川合伸明、阿藤敏行、齋藤文一、田村英樹、伊藤俊、菊地昌枝、中村一隆、近藤建一、高速飛翔体衝突に対するムライトセラミックスの破壊と防護特性、平成 19 年度衝撃波シンポジウム、2008.3.17、

東京

⑨ T. Atou, N. Kawai, K. G. Nakamura, K. Kondo, S. Ito, K. Yubuta, M. Kikuchi, TEM observation of disproportionation of mullite and sillimanite under shock compression, AIP Conference Proceedings, Shock Compression of Condensed Matter-2007, 2007.6.24, Hawaii, USA.

⑩ N. Kawai, Y. Harada, M. Yokoo, T. Atou, K.G. Nakamura and K. Kondo, Dynamic Deformation and Fracture of Mullite(3Al₂O₃·2SiO₂) Ceramics Under Hypervelocity Impactm, 10th Hypervelocity Impact Symposium, 2007.9.26, Williamsburg, Virginia, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 建一 (KONDO KENICHI)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・教授

研究者番号：5 0 1 1 1 6 7 0

(2) 研究分担者

阿藤 敏行 (ATOU TOSHIYUKI)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・准教授

研究者番号：4 0 2 4 1 5 6 7

川合 伸明 (KAWAI NOBUAKI)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・研究員

研究者番号：6 0 4 3 1 9 8 8

(3) 連携研究者

なし