

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22224012

研究課題名(和文)高エネルギー密度物質準安定相生成と凍結機構解明

研究課題名(英文)Study of Creation and Freezing Mechanisms of High Energy Density Solid States

研究代表者

兒玉 了祐 (Kodama, Ryosuke)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80211902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 168,300,000円

研究成果の概要(和文)：高出力レーザーを用いて従来の静圧縮技術では達成できないテラパスカル超高压発生・制御技術を構築し、BC8構造の炭素や液体金属炭素を初めて実現した。レーザープラズマによるパルス高輝度光源やXFELを利用したダイナミック診断技術を構築し、超高压下での物質構造変化・相転移ダイナミクスの詳細を調べ、複雑な混合構造など静圧縮では見られない構造を明らかにした。さらに相転移の起点となる欠損のダイナミクスの詳細を明らかにした。これらの成果から、テラパスカルの圧力域で生成されるBC8構造の炭素を大気圧状態に取り出す手法として動的圧縮特有の微細混合構造(ダイヤモンド・BC8)生成が期待できる。

研究成果の概要(英文)：High-pressure compression and control technologies were developed with high-power lasers in a pressure range of Tera-Pa, which was unachievable with a conventional static compression technique. States of BC-8 structured Carbon and liquid-metallic Carbon were obtained with these technologies for the first time. Dynamical probing technologies were also established by using a radiation source with laser-plasmas and XFEL. These compression and probing techniques realized the investigation of details in the dynamics of the structure of matter under the high pressures, resulting in the complex and mixed structures of compressed-matter, never created with a static compression technique. Based on these results, creation of complex structures with different phases of matter, e.g. diamond and BC8 structures, and micro-mezzo mixed scales could be created in the compressed carbon created at Tera-Pa, which would lead to existing of quasi-stable high energy density matter at ambient pressures.

研究分野：光科学・プラズマ科学

キーワード：高エネルギー密度 パワーレーザー 高压物性 新物質材料 準安定相

1. 研究開始当初の背景

高出力レーザーによる高エネルギー密度科学は、その学際性から、新たな学術の創成が期待できると同時に様々な学術を融合による新しい科学技術創出の可能性がある。

そのような中で、静圧縮では得られない超高压状態が高出力レーザーで実現でき世界的にも注目されている。一方で、通常その温度は高くプラズマ状態もしくは非定常な物質相が研究対象となっていた。そのため国内外ではほとんどが惑星内物質など重力で決定されるエントロピー以上の温度状態ではこれまで、研究がなされていなかった。

しかし、我々が開発したレーザーによる動的圧縮技術は、テラパスカルを超える超高压の高エネルギー密度状態にありながら比較的低温の固体相である物質状態を生成できる段階に入ろうとしている。さらに独自の非平衡動的圧縮技術や試料回収技術により超高压で生成された新たな相を凍結し取り出すことができるようになってきている。

2. 研究の目的

本研究では、物質を高出力レーザーで動的圧縮し、地上に存在していない高エネルギー密度物質状態を実現する。例えば通常のダイヤモンドの2倍以上の密度をもった高密度状態の固相ダイヤモンド(BC8)であり、このために世界的競争力を持った我が国独自の高エネルギー密度物質に関する成果と圧縮・診断技術を組み合わせた技術を開発する。さらに安定な高エネルギー密度物質として、すでに取り出しに成功している金属シリコン等をもとに非平衡・超高压状態で実現できる安定な高エネルギー密度物質生成と準安定相凍結の機構を明らかにする。これらにより、BC8炭素など常温常圧で、地上に存在していない高エネルギー密度新物質の安定な取り出し手法を探索することを目的とする。

3. 研究の方法

高出力レーザーでテラパスカル以上の圧力でダイヤモンドを圧縮し、高エネルギー密度状態の固相(BC8)炭素を実現する。そのために動的圧縮技術、ダイナミック診断技術の最適化を行う。また高エネルギー密度状態として取り出しに成功している金属シリコンなど動的圧縮が誘起する物質相転移・圧力解放・準安定相凍結ダイナミクスをその場診断する。また新たにX線自由電子レーザーを利用し構造ダイナミクスの詳細を実験的に調べる。さらに回収試料の詳細な材料分析を行い、ダイナミック診断結果と総合的な解析を行うことで、非平衡高エネルギー密度新物質生成と準安定相凍結の機構を明らかにする。

このために、診断・圧縮・評価・解析の専門家による組織的連携体制で本研究計画を実施する。またこれまで開発してきた動的圧縮技術、ダイナミック診断技術及び高エネ

ギー密度物質生成に関する研究成果をもとに、新たな超高压発生技術開発と高エネルギー密度ダイヤモンドの生成を行う。さらに超高压物質の材料評価および相転移物理の解明を行うことで、高エネルギー密度状態の物質の凍結機構の解明と新材料の可能性を評価する。

4. 研究成果

高エネルギー密度新物質の準安定相凍結機構を明らかにし、安定な高エネルギー密度ダイヤモンド生成の可能性を探索することを最終目標とし以下の成果が得られた。

[高エネルギー密度ダイヤモンド生成]

レーザーで物質をテラパスカル以上に圧縮し新物質状態を生成することを目指した a) 超高压発生制御技術の開発と応用、その場観測としての b) ダイナミック診断技術の開発、さらにはこれらを利用した c) テラパスカル領域の新物質相の生成を実施した。

a) 超高压発生制御技術の開発

3つの異なる手法で圧力時間波形制御によるテラパスカル域準等エントロピー圧縮を行った。

1つ目は、波形整形されたパルスレーザーにより、テラパスカル圧力状態を実現した。これにより、固体巨大天体(スーパーアースなど)の内部状態など未探索の物質状態が実験室で生成できる可能性もでてきた。

2つ目に物質中での衝撃波伝播特性を考慮した圧力制御を行った。レーザー吸収層であるアプレータを多層膜することにより、段階的に圧力増大するパルス波形整形を適用することで、低エントロピー圧縮を最適化することに成功し、固体炭素状態のまま1000万気圧超の超高压状態の実現を確認した。

3つ目に静的圧縮により予備圧縮した試料をレーザー動的圧縮することにより、より低エントロピー圧縮状態を生成するためのハイブリッドセルの開発を行い、大型レーザー照射可能な比較的容易に大体積の予備圧縮試料を生成できるセルの実現に我が国で初めて成功した。予備圧縮の効果が顕著に得られる液体試料(水)に適用し、イオン性伝導流体から電子性伝導流体への遷移領域の物性を調べることに世界で初めて成功した。

さらに、圧力スケール物質である金の微細構造ターゲットと線結像型の速度干渉計を用いることで、圧縮初期過程における圧力の時間進展を信頼性高く決定することに初めて成功した。

b) ダイナミック診断技術の開発

レーザー圧縮のその場観察を目的に、診断用ビームラインの整備、サブテラパスカル域での新しい超高压観測窓材の発見、レーザープラズマならびにX線自由電子レーザーを利用したX線診断技術の開発と応用を

行った。

レーザー圧縮で誘起される物質の状態量を評価するため、高時間分解の粒子速度(物質速度)計測のための診断用レーザービームライン整備を行った。周波数領域干渉計によって、超高速で変位する試料表面からの反射光の参照光に対する変化を検出し、速度変化を検出できるようになった。これとは別に X 線自由電子レーザーと同期した高出力レーザーによる実験に備え、広帯域高出力レーザーの一部を光源とした周波数領域干渉計を整備した。

新しい超高压観測窓材の探索として、衝撃圧縮下でダイヤモンドよりも高い非圧縮性(固い)を持つ物質である $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) に関して、超高压下での特性評価を行った。2 TPa までの圧縮曲線などを求め相転移や機械的・光学的特性を調べることに初めて成功した。GGG はその大きな初期密度に起因して、極超高压域においてもダイヤモンドよりも高い非圧縮性が確認された。さらに、高压科学や地球科学で最重要物質のひとつである酸化マグネシウム (MgO) についても評価し、世界で初めて MgO が 400 GPa 超の領域で透明(可視域)な固体でありショックアンビルとなり得ることが見いだした。

X 線診断技術の開発として、レーザープラズマ特性 X 線をプローブ光とするための「プラズマデバイス」を用いて、高速その場 X 線回折診断技術の開発および応用実験を行った。角度分解とエネルギー分解が同時に可能な結晶分光器を開発した。これにより低エントロピー圧縮過程におけるその場リアルタイムの広角 X 線回折イメージングを実施し、複数格子面の変化を同時に観測することに成功した。さらに回折 X 線のみならず、インコヒーレントに散乱された X 線のスペクトルを取得して物質状態を理解するための診断技術の開発および応用実験を行った。散乱角 90 度の非共同 X 線散乱スペクトルにおける弾性散乱成分と非弾性散乱成分を解析することにより、極超高压縮された試料のミクロな物質状態の推定や状態量の決定を可能とした。

また X 線自由電子レーザーを用いた反射 X 線回折法の確立とそれを用いた高压相転移の時定数評価も並行して行い、無拡散タイプの構造変化が 10 ps のタイムスケールで進行するとともに、その格子が数 10 倍の残存時間を有することなどが明らかになった。

c) テラパスカル領域の新物質相の生成

レーザー衝撃波を制御しテラパスカルの圧力を発生すると同時にその場観測を実施することで、液体金属炭素や BC8 構造炭素の状態を実証した。さらにサブテラパスカル高压相凍結物質の探査を行った。

テラパスカル以上のレーザー衝撃波で圧縮した炭素を可視計測と X 線計測(X 線散乱スペクトル)でその場観察を行い、液体金

属炭素の存在を初めて明らかにした。強固な共有結合に起因して、融点を超える高压高温下においても系の熱エネルギーに対してイオン相関が 40 倍も高い液体金属となっていることがわかった。これは第一原理 MD 計算と極めてよい一致を示した。

ダイヤモンド中に誘起されたレーザー衝撃波を、多層のショックアンビルによる反射衝撃波によって増幅し、低エントロピー的圧縮シテラパスカルを超える固体-固体相転移状態の実現に成功した。ターゲット裏面から速度干渉計による衝撃波面の速度計測を行い、ダイヤモンドの第一衝撃圧縮状態と反射ショック圧縮状態を決定した。これにより、溶融線以下のポストダイヤモンド相(BC8 構造炭素)領域の状態を世界で初めて生成した。さらに衝撃波インピーダンスを利用しテラパスカルで 8000K 以下を実現し BC8 構造炭素の状態を初めて実現した。

サブテラパスカル高压相凍結物質の探査として、非平衡圧縮で成功している数 10 ギガパスカル領域の高压相凍結機構がサブテラパスカルまで拡張可能であるかどうかを実証するため、開発してきた種々のレーザー照射条件と回収技術を駆使して SiC をはじめとした高压相回収実験を初めて試みた。またその場 X 線診断と速度干渉計測定を組み合わせることで応力状態と格子状態を直接結びつけることに成功し、塑性変形状態への遷移の前駆状態として動的超高压縮において異常弾性状態が生成されることを確認した。またこの異常弾性圧縮状態の格子と高压相が相互作用して新しい物質状態を凍結しうることが示唆された。

[高エネルギー密度新材料物質生成機構]

超高压圧縮した物質の高压相凍結を解明し新しい材料の可能性を検討するために高压相凍結実績あるシリコン等を用いた a) 相転移その場観測、b) 高压相凍結物質の材料分析、さらにはモデル構築のための c) 欠陥のダイナミクス診断を実施した。

a) 相転移その場観測

シリコンの多結晶化が進展する 100 ギガパスカルの超高压領域において、固体の半導体-金属転位がピコ秒タイムスケールで起こることを世界で初めて確認した。近赤外レーザーをプローブに用いた赤外速度干渉計により、シリコン内部を伝搬する衝撃波面を直接観測することで、圧縮下固相のシリコンが金属性の反射率をもつことが示された。シリコンに衝撃波が入射した瞬間、計測系の時間分解能 (~70 ps) を超える超高速で進展した結晶面のすべりによる無拡散相転移を初めて直接観測した。

さらに高速その場 X 線回折構造解析を行い、格子圧縮ダイナミクスに関する新しい知見が得られ始めた。脆性材料であるシリコンに対しては単結晶性に検出感度が高い

広角 X 線回折法を用いた実験を行い、過圧縮弾性状態を経て動的降伏圧力を超えた瞬間に多結晶化が進展が促されるという動的圧縮下の結晶の振舞いが直接的に観察された。

独自に開発してきたその場時間分解広角 X 線回折イメージングをシリコン試料に適用し、圧力の増大とともに異常弾性状態の増大が確認された。60 万気圧の最終到達圧力のケースでは、これまでの知見に基づく六法細密構造シリコンの生成は確認できず、異常圧縮された立方相ダイヤモンド構造シリコン（元の半導体シリコン構造）と *imma* 金属シリコン構造の規則的な混合状態の生成を初めて実証した。シングルショット観察で優位に認められる信号から、無視できない量のエキゾチックシリコン状態が生成されたこと、その残存時間が長いことが示唆される。このことはレーザーショット回収シリコンにおいて電気抵抗率が異常減少したことと矛盾しないため、金属シリコン残存メカニズムにおいてはこのような相転移格子ダイナミクスが影響していると考えられる。

b) 高圧相凍結 Si の材料分析

単結晶シリコン（純度 11N）の(100)面に対して垂直にフェムト秒レーザーを照射し、照射部分の結晶構造を X 線回折によって解析した。レーザー照射部にはシリコンの高圧相である \square -Sn, *Imma*, *sh* 構造と、圧力解放過程に現れる準安定相である BC8 構造が存在することがわかった。レーザー照射部の断面を集束イオンビームで切り出し薄片化し、透過電子顕微鏡で観察した。その結果、高圧相である \square -Sn 構造はナノメートルオーダーのグレインサイズで存在し、また高密度の積層欠陥に囲まれて存在することがわかった。これらの結果より、高エネルギー密度物質相は、高密度の格子欠陥によって膨張を妨げられることによってその高いエネルギー密度を維持していることが示唆された。

c) 欠陥のダイナミクス診断

高圧力印加によって、材料中には様々な格子欠陥が導入され得る。それらの格子欠陥は、高圧相への転移の起点および除荷過程での高圧相凍結において重要な役割を担い得るものと予想される。しかし、ナノスケールの格子欠陥や原子サイズの格子欠陥である点欠陥の挙動は、不明な点が多い。電子顕微鏡法を用いて、金属中の個々の微小格子欠陥の挙動を抽出する方法を開発し、それらの手法を体心立方金属に適用し、数々の新たな知見を得ることに成功した。

またナノスケール欠陥の挙動として非一様圧縮において生成された転位は材料の変形を担う極めて重要な欠陥である。ナノサイズの転位である転位ループどうしの衝突過程の電子顕微鏡によるダイナミック観測をおこなった。その結果、ナノサイズの転位ループ同士の衝突の場合、転位のナノ効果により反応が進行し、一方の転位ループが他

方を吸収することを世界で初めて明らかにした。

点欠陥の挙動の一種である自己格子間原子の動的挙動は未解明であった。点欠陥の導入条件を確実に制御した上で、点欠陥集合によって形成されるナノスケールの転位ループの成長過程の電子顕微鏡によるダイナミック観測とカイネティック・モンテカルロ・シミュレーションを組み合わせることによって、自己格子間原子の移動次元を抽出することに、世界で初めて成功した。

[まとめ]

高出力レーザーにより静圧縮技術では達成できないサブテラパスカルからテラパスカルの超高压発生・制御技術を構築した。その結果、世界に先駆けて BC8 構造の炭素を実現する状態を実現した。また合わせて液体金属炭素を実現しその状態変化を明らかにした。超高压縮技術に加えその状態ダイナミクスおよび構造ダイナミクスをその場で診断する技術を構築し、超高压下での物質構造変化から相転移ダイナミクスの詳細を調べることができるようになった。特に構造ダイナミクスに関しては、レーザープラズマによるパルス高輝度光源や X 線自由電子レーザーを利用し世界に先駆けたその場診断技術を開発した。その結果、従来考えられていた以上に早い速度で相転移したり、静圧縮では見られない構造や複雑な混合構造に変化したりすることが明らかになった。さらに従来の電子顕微鏡技術を利用し相転移の起点となる欠損のダイナミクスの詳細を明らかにすることができた。これらの成果をもとに、テラパスカルの圧力域で生成されるダイヤモンドより硬いといわれている BC8 構造の炭素を大気圧状態に取り出せる可能性を検討できた。シリコン同様に動的圧縮特有の微細かつ規則的な混合構造（ダイヤモンド BC8）により高圧状態凍結が期待できるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 39 件)(すべて査読あり)

- 1) “Probing iron at Super-Earth core conditions”, N.Ozaki(11番目)R. Kodama, (12番目)他15名, Phys. Plasmas, Vol. 22, No. 2, pp.022705_1-4(2015)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4907244>
- 2) “Femtosecond laser-driven shock-induced dislocation structures in iron” T. Matsuda, T. Sano, K. Arakawa, O. Sakata, H. Tajiri, and A. Hirose, Appl. Phys. Express, 7, 122704 (2015)
<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.7.122704>
- 3) “Dislocation structure produced by an ultrashort shock pulse” T. Matsuda, T. Sano, K. Arakawa, and A. Hirose, J. Appl. Phys. 116, 183506(2014)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4901928>

- 4) "Characterization of laser-driven ultrafast shockless compression using gold target", K. Miyanishi, N. Ozaki (2 番目), R. Kodama (17 番目) 他 19 名, *J. Appl. Phys.* Vol. 116, No. 4, pp. 043521_1-4(2014) 10.1063/1.4891802
- 5) "Multiple-shocks induced nanocrystallization in iron", T. Matsuda, T. Sano, K. Arakawa, and A. Hirose, *Appl. Phys. Lett.* 105, 021902(2014) <http://dx.doi.org/10.1063/1.4890389>
- 6) "Shock-induced silicate vaporization: The role of electrons", N. Ozaki (7 番目), R. Kodama (13 番目) 他 8 名, *Journal of Geophysical Research* 117, E04007_1-14 (2012). DOI:10.1029/2011JE004031
- 7) "Formation of High-Density Dislocations and Hardening in Femtosecond-Laser-Shocked Silicon", M. Tsujino, T. Sano, N. Ozaki(6 番目), R. Kodama (7 番目) 他 5 名, *Applied Physics Express*, 5, 022703_1-022703_3 (2012). DOI:10.1143/APEX.5.02270
- 8) "Detection and In Situ Switching of Unreversed Interfacial Antiferromagnetic Spins in a Perpendicular-Exchange-Biased System", K. Arakawa (7 番目) 他 11 名, *Physical Review Letters*, 109, 77202_1-5 (2012). DOI:10.1103/PhysRevLett.109.077202
- 9) "Temperature measurements of Electrostatic Shocks in laser-produced counter-streaming plasmas", N. Ozaki (16 番目), R. Kodama (19 番目) 他 19 名, *Astrophysics and Space Science*, 336, 283-286 (2011). 10.1007/s10509-010-0525-5
- 10) "Laser-shock compression and Hugoniot measurements of liquid hydrogen to 55 GPa", T. Sano, N. Ozaki, R. Kodama (21 番目) 他 19 名, *Physical Review B*, 83, 054117_1-7 (2011). 10.1103/PhysRevB.83.054117
- 11) "Reaction Rate between 1D migrating Self-Interstitial Atoms: An Examination by Kinetic Monte Carlo Simulation", T. Amino, K. Arakawa, and H. Mori, *Philosophical Magazine*, 91, 3276-3289 (2011). 10.1080/14786435.2011.575411
- 12) "Quantitative Analysis on Size Dependence of Eutectic Temperature of Alloy Nanoparticles in the Ag-Pb System", C.L. Chen, J.-G. Lee, K. Arakawa, and H. Mori, *Applied Physics Letters*, 98, 83108_1-3 (2011). 10.1063/1.3558921
- 13) "Direct Observation of the Coalescence Process between Nanoscale Dislocation Loops with Different Burgers Vectors", K. Arakawa 他 2 名, *Acta Materialia*, 59, 141-145 (2011). doi:10.1016/j.actamat.2010.09.018
- 14) "Structure dependence of metallization density in solid atomic hydrogen using dynamical mean field theory", R. Kodama (4 番目) 他 3 名, *Phys. Rev. B*, 82, 195123_1-5 (2010). doi.org/10.1103/PhysRevB.82.195123
- 15) "In-situ spectroscopic observations of silicate vaporization due to >10 km/s impacts using laser driven projectiles", T. Sano (7 番目), N. Ozaki (9 番目), R. Kodama (17 番目) 他 15 名, and T. Matsui, *Geophysical Research Letters*, 37, L23203_1-5(2010)10.1029/2010GL045330
- 16) "Proton radiography of a shock-compressed target", N. Ozaki (15 番目) 他 22 名, *Physical Review E*, 82, 016407_1-6 (2010). doi.org/10.1103/PhysRevE.82.016407
- 17) "Static compression experiments for advanced coupling techniques of laser-driven dynamic compression and precompression target", N. Ozaki(2 番目), T. Sano (13 番目), R. Kodama (16 番目) 他 13 名, *Journal of Physics* bf 215, 012152_1-4 (2010). doi:10.1088/1742-6596/215/1/012152
- 18) "Significant static pressure increase in a precompression cell target for laser-driven dynamic compression experiments", N. Ozaki (2 番目), T. Sano (5 番目), R. Kodama (12 番目) 他 9 名, *Physics of Plasmas*, 17, 054502_1-4 (2010). 10.1063/1.3381039
- 19) "Impact experiments with a new technique for acceleration of projectiles to velocities higher than Earth's escape velocity 11.2 km/s", T. Sano (5 番目), N. Ozaki (16 番目), R. Kodama (17 番目) 他 18 名, *Journal of Geophysical Research*, 115, E04003_1-9 (2010). 10.1029/2009JE003385
- 20) "Measurement of preheating due to radiation and nonlocal electron heat transport in laser-irradiated targets", N. Ozaki(9 番目), T. Kimura, K. Miyanishi, R. Kodama(12 番目) 他 12 名, T. Sakaiya, and A. Sunahara, *Physics of Plasmas*, 17, 032702_1-6 (2010). <http://dx.doi.org/10.1063/1.3372099>
- 21) "The strength of single crystal copper under uniaxial shock compression at 100 GPa", R. Kodama (7 番目), N. Ozaki (12 番目) 他 16 名, *Journal of Physics - Condensed Matter*, 22, 065404_1-5 (2010). doi:10.1088/0953-8984/22/6/065404
- 22) "In situ Observations of Crystalline-to-liquid and Crystalline-to-gas Transitions of Substrate-Supported Ag Nanoparticles", K. Arakawa (3 番目) 他 3

- 名, Applied Physics Letters, 96, 253104_1-3 (2010). 10.1063/1.3456382
- 23) “Langevin Model for Real-time Brownian Dynamics of Interacting Nano-defects in Irradiated Metals”, K. Arakawa (3 番目) 他 7 名, Physical Review B (selected as Editors’ suggestion), 81, 224107_1-15 (2010). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.224107>

〔学会発表〕(計 28 件)(招待講演)

- 1) “Investigating Matter at Extreme Pressures”, N. Ozaki, Matter in Extreme Conditions from MATERIAL science to PLANetary physics (MECMATPLA), Emmetten, Switzerland, 2015.2.4
- 2) “Dynamics and Phase Transition of High Energy Density Matter”, N. Ozaki, Plasma Conference 2014(PLASMA2014), Toki Messe(Niigata) Nov.18 2014
- 3) “High Pressure, Research at Tuning Energy Density to Reveal or Control Properties of Extreme Matter”, N. Ozaki, Gordon Research Conference "High Pressure, Research at Tuning Energy Density to Reveal or Control Properties of Extreme Matter", Biddeford, USA, 2014.6.24
- 4) “Photon Science and High Energy Density Science in Japan”, R. Kodama, Science council of Japan, Tokyo, June 2, 2014
- 5) “High Energy Density Science” R. Kodama, International Conference on High Energy Density Sciences 2014 (HEDS2014), Pacifico Yokohama (Kanagawa) April 22, 2014
- 6) “Recent Studies on Elementary Processes of Radiation Damage using in-situ TEM”, K. Arakawa, T. Amino, H. Mori, MRS Fall Meeting 2012, Materials under Extremes: from Fundamentals to Component Behavior, Boston, MA, USA, Nov 26- 30, 2012..
- 7) “Exploring of Novel States with High Energy Density by XFEL and High Power Laser”, R. Kodama, The 2nd International Symposium on Laser Interaction with Matter (LIMIS 2012), Xian, China, September 9-12, 2012.
- 8) “Exploring of Exotic States with High Energy Density by High Power Laser”, R. Kodama, 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics/16th International Congress on Plasma Physics (2012 EPS/ICPP), Stockholm, Sweden, July 2-6, 2012.
- 9) “High Energy Density Research with High Power Lasers Related to Material Sciences”, R. Kodama, 13th International Symposium on Laser Precision

- Microfabrication(LPM2012), Washington,DC, USA, June 12-15, 2012
- 10) “Front Edge of High Energy Density Science with High Power Laser”, R. Kodama, Plasma Conference 2011, Kanazawa, Japan, Nov. 22-25, 2011
 - 11) “Ultrafast and microscopic observation of laser shock induced material's behaviors”, N. Ozaki, The 3rd Inter. Conference on Laser Peening and Related Phenomena, Osaka, Japan, Oct. 11- 14, 2011.
 - 12) “Extreme Hugoniot/off-Hugoniot measurements for carbon and water with optical/x-ray diagnostics”, N. Ozaki et al., International Workshop on Warm Dense Matter, Pacific Grove, USA, Jun. 5-8, 2011.

〔図書〕(計 4 件)

- 1) 兒玉了祐, 物理科学雑誌「パリテイ」 Vol. 29, No. 7, 19-23 (2014) 「切り拓かれる極限状態の科学」
- 2) 兒玉了祐, 物理科学雑誌「パリテイ」 2011 01, 19-20(2011) 「高エネルギー密度科学の新展開」
- 3) 兒玉了祐, 雑誌「オプトロニクス」 8, 118-123 (2012) 「高エネルギー密度新物質材料の探索」
- 4) 兒玉了祐, 物理科学雑誌「パリテイ」 Vol. 21, No. 1, 19-20 (2010) 「高エネルギー密度科学の新展開」

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)
取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.eie.eng.osaka-u.ac.jp/ef/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
兒玉 了祐 (KODAMA Ryosuke)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号: 80211902
 - (2) 研究分担者
尾崎 典雅 (OZAKI Norimasa)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 70432515
- 佐野 智一 (SANO Tomokazu)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 30314371

荒河 一渡 (ARAKAWA Kazuto)
島根大学・総合理工学研究科・准教授
研究者番号: 30294367