高密度パルス光と物質との相互作用解析

豊田 浩一

東京理科大学 基礎工学部電子応用工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

Analysis of High-Density Optical-Pulse Interaction with Materials

Koichi TOYODA

Department of Applied Electronics, Faculty of Industrial Science & Technology, Science University of Tokyo
2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510

(Received January 13, 1999)

Recently, it has become feasible to apply high intensity optics for the development of novel material processing technology. High optical intensity is attained by the use of chirped-pulse amplification of ultra-short laser pulse. Such a high-intensity pulsed laser is referred to as High-Density Optical-Pulse. The methods of analyzing the interaction between the high-density optical-pulse and materials have been investigated in light of their possible use in future material processing technology. In the present paper, the research field and contents of such new interaction phenomena are outlined.

Key Words: Mass-spectroscopy, Advanced measurement, Electronic heating, Shock-wave, Simulation technology

1. はじめに

最近の超短パルス光増幅技術の発展により、通常の実験室程度の広さでも十分高強度の短パルスレーザー光が得られる。このような高強度レーザー強度が実用面から物質相互作用に応用される。短時間パルスでしかも高いレーザー強度は、よく言われるように人類がはじめて到達しつつある超短時間、かつ超高電場領域といえる。このような特別な物理的条件を実現し得る超短パルスレーザーを高密度パルス光という。

さて、高密度パルス光による先端の物質制御技術は、将来の産業技術として重要である。それを目指して平成9年度から科学技術振興調整費による「高密度パルス光の発生と先端の物質制御」研究が開始された。この解説は平成8年度に作成された調査報告書から当該分野を要約して紹介するものである。ここで、相互作用解析は、高密度パルス光によってもたらされる新しい物理、化学現象の探索、解明を目的とし、またその手段を開発することにより先端の物質プロセッシングの発展に寄与する。

高密度パルス光による先端の物質プロセッシングのための基礎技術の開発にあたるものとして、質量分析的手法、相互作用シミュレーション、超高速電子加熱、超強衝撃波などによる相互作用解析が重要である。

なお、ここに紹介する内容は、上述の報告書¹⁾から抽出、記載したものである。分厚い報告書の要点を要約紹介し、より広く一般の理解を得ることを意図するものである。

2. 高密度パルス光と相互作用解析

高密度パルス光による物質制御に関して基礎となる技術開発項目をFig.1に模式的に示す。高密度パルス光の入

Fig.1 Purpose of research project of the analysis of interaction of high-density optical pulse and materials.

射に伴い、物質内部では電子系の加熱、衝撃波を発生する。また、外部にアブレーションの結果として粒子放出が生じる。これら現象の計測・解明のために相互作用のシミュレーション技術、高機能技術開発が重要である。次節には、それぞれの項目について文献調査の結果を踏まえた研究の必要性等を述べる。紙数の制限のため誤解があるかもしれないが容赦願いたい。

3. 相互作用解析技術

3.1 質量分析的手法²⁻¹²⁾

高密度パルス光を物質プロセッシングに活用するには、金属、無機、有機化合物、生物物質など種々の物質について、物質相互作用解析に関する研究が必要である。その一つとして質量分析的手法がある。固体表面から放出される各種粒子の質量、エネルギー、化学種などの測定手段である。

Fig.2は、質量分析的手法による物質相互作用解析の研究をまとめたものである。研究に使用される装置として超短パルスレーザー、相互作用チャンバー、集光光学系、回転ターゲット、イオン加速装置、紫外パルスレーザー、遅延時間パルス発生器、吸収分光装置などが使用される。研究の目標とするところは、種々の条件下での質量分布、エネルギー、イオン価数等であり、そのために、光イオン化法、過渡吸収分光技術等が利用される。これにより、従来未解明であった中性粒子ビーム、ラジカルビーム、イオンビーム等による物質制御が可能となる。

光イオン化等によりイオンと中性粒子を分離して計測することが重要とされる。レーザーイオン化では、電子衝撃に比べ、より小さい分子への分解は少ない。また、アブレーションしきい値近傍での粒子の速度分布が通常のマクスウェル・ボルツマン分布に一致しない。通常起こるブルーム内の複雑な反応が避けられシンプルな速度分布が得られるという可能性が高い。

3.2 相互作用シミュレーション技術¹³⁻³⁸⁾

高密度パルス光と物質相互作用を、固体・液体・気体を同時に解くことのできる計算法CIP(Cubic Interpolated Pseudo-particle)法によりシミュレーションし、相互作用の物理過程を明らかにする必要がある。それにより、物質制

Fig.2 Outline of mass-spectroscopic study for analysis of materials interaction.

御を行うための予測技術、計測データ解析技術が確立される。

高密度パルス光と物質との相互作用では、ピコ秒から、フェムト秒の短い時間に現象が起き、空間スケールもミクロン、サブミクロンである。このような現象を直接計測することは難しい。したがって、限られた計測結果から起こった現象の全体像を推測することが多くなる。

Fig.3は、高密度パルス光が照射された時に生じる非常に短時間の間の反応、融解、蒸発をシミュレーションする際、3次元流体コードによるモデル化と数値計算の手法の改良に考慮すべき種々の物理過程を示した。東京工業大学の研究グループではこれらの過程を第1原理から解くための手法を開発し、固体から液体・気体に及ぶ広範囲な物性を一つの統一した手法で解くことに世界で初めて成功した。このようなアプローチは世界的にもほとんどなく、これと実験との密接な協力により、実験を予測可能とする計算コードが実現される。

3.3 高機能計測技術³⁹⁻⁶⁵⁾

ピコ秒からフェムト秒といった超短時間域の高密度パルス高励起による光と物質との相互作用時間は非常に短いものとなる。この場合、物質内の励起状態は、例えば電子系の温度と格子系の温度との間の不一致が生じるような非平衡状態となり、従来とはまったく異なった新しい現象が生じる。

このような現象を新材料や新デバイスに応用するためには、超短時間のエネルギー緩和やエネルギー移動を探ると共にそのダイナミクスを解析することが不可欠である。ところがそれらの技術はいまだ十分ではない。したがって、高密度光と物質との相互作用を解析、制御するために必要な情報を迅速、高精度に取得する計測技術の開発が強く望まれる。そして、このような新技術を開発するには、上記のような相互作用を生起させ、実際に計測しながら、現象の解析、制御に必要な情報を探索し、種々の計測技術を開発して一体化する研究が必要である。

具体的にはFig.4のように、相互作用に由来する発光、相互作用を探るプローブ光の出力変化を10ps以下の超短時間

Fig.3 Consideration of various models of physical processes and improvement of numerical calculation methods for the simulation of laser and material interactions.

Fig. 4 Concept & outline of advanced measurement technologies for laser-interaction with materials.

でかつ同時に波長域300nm-1000nm程度の領域で分光し、超短時間分解分光を行う。また空間エネルギー移動を知るためには、相互作用を空間分解して10ps以下の超短時間精度の同時計測を行い、超高速時間分解イメージを得る。これらの計測を通じて、非平衡状態にある相互作用ダイナミクスを研究し、その制御法を探索する。

高密度パルス光を物質に入射した時に生起する相互作用としては、以下のものが知られている。気体においては内殻電子の励起による原子や分子の多重イオン化、および強光電場により加速された電子の再散乱によるXUV光の発生、無機物固体においては瞬時の光解離による表面の分解、有機物、生体物質及び液体においては超音速のプラズマ発生と衝撃波や周辺の熱波の発生がある。これらの現象のダイナミクスは従来以下のように計測されていた。すなわち最終生成物や終状態および時間積分としての空間分布の観測による上記過程の推論、および、ある励起状態に共鳴させた遅延プローブ光による時間変化の計測等である。

現状は、超高速ダイナミクスの多様な情報を得るのにまだ不十分である。たとえば、終状態を見るだけではダイナミクスが多段にわたり複数の過程が競合した場合、推論が不可能であったり、中間過程が未発見に終わる。ポンプアンドプローブ法に類するものでは、その共鳴状態のみが主に観測され、その他の効果が検出されない。また直接的な観測でないため、解釈が難しい場合が多い。

以上から、高密度超短パルス高励起下において生起される新しい超高速ダイナミクスの多様な観測を、ピコ秒からフェムト秒といった超高速時間領域で多次元に、かつ直接的に計測できる手段を開発しなければならない。

3.4 超高速電子加熱⁶⁶⁻⁶⁹⁾

物質との相互作用においてレーザー光は電子を加熱し、次いで電子系のエネルギーが格子系に移動する。電子-格子緩和時間より短いフェムト秒レーザー光との相互作用においては電子温度が高く格子温度が低い非平衡状態が過渡的に生じる。熱伝導による加熱時間より速く格子温度が上昇し、液体状態を経ずに格子系は気化し、真空中にアブレートする。このような電子加熱時間が電子-格

子緩和時間より短い場合の光と物質相互作用やそれによる新しい物質制御法の研究が必要である。とくにレーザー光の超短パルス性、回折限界集光性、波長による物質選択性等の特長を生かしたレーザー光を「マイクロドリル」として用いる極限的加工法の物理的基礎の確立を目指す。

Fig.5は、レーザー光照射による物質の温度分布と時間変化、発生粒子の時間的・空間的分布、イオン化状態等を調べるための装置構成の概念図である。このための能動的測定として主レーザーに同期したプローブパルス光を照射して反射率変化、誘起蛍光を測定する。また、受動計測としては発生可視光、紫外光、軟X線の計測、粒子スペクトルを測定する。こうすると、単一照射ごとの現象と多数回の積算により明らかになる現象の両方の測定が可能である。この計測に加え、レーザー照射時の被加工物の表面形状を実時間計測し、照射条件を制御する帰還加工手法を開発することができる。

3.5 超強衝撃波技術⁷⁰⁻⁷⁹⁾

高密度パルス光と物質相互作用のうち、衝撃波を介在させることによって実現できる超高压発生およびその圧縮状態の解析が重要である。パルス光を固体表面に照射し、従来達成困難な1000万気圧を超える超高压力の発生が可能になる。この動的圧縮状態の実現は先端の物質制御技術において不可欠な基盤技術のひとつである。

超強衝撃波に対して固体がどのように振舞うかに関しては、未だ多くの結果があるわけではなく、この状態の解析法も確立されていない。また、平面性の優れた超強衝撃波の発生技術もあわせて重要である。

Fig.6は高密度光を利用した超強衝撃波の圧縮状態解析法を示す。(上)はステップを有する不透明ターゲットにパルス光を照射した時発生した衝撃波の速度をステップ表面の発光を利用してストリークカメラで計測する。(中)はフライヤーにパルス光を照射し、アブレーションで加速された一部が透明ターゲットに高速衝突した時の発光をストリークカメラで計測し、衝突速度を測定する。(下)は透明ターゲットの衝撃圧縮状態をORVIS(レーザー干渉速度計測)法で粒子速度を計測することにより圧縮状態を光時間分解で計測する。

Fig.5 Illustration of experimental setup for material-control technology by fast electronic heating.

Fig.6 Study of ultra-high intensity shock-wave compression.

4. 期待される効果：まとめに代えて

高密度パルス光と物質相互作用の解析手法として、ここでは質量分析的手法、相互作用シミュレーション、高機能計測技術、超高速電子加熱、超強衝撃波などによる相互作用解析が重要であるとして紹介した。高密度パルス光を用い、質量分析的手法において速度分布、質量分布が精密に制御できるならば薄膜形成などの低温化、損傷低下、エピタキシャル温度の低温化、それと新しいイオンビーム技術が生まれる。シミュレーション技術では、ピコ秒、フェムト秒という短い時間領域、空間スケールもミクロンからサブミクロンという微細な領域でのシミュレーションが可能となる。これは限られた計測結果から全体像の推論を可能にする。今までは計算法の問題から信頼できる計算コードが作成できなかった。高機能計測の開発では、これによって、直接的に高密度超短時間パルス光励起下での相互作用領域の多次元に亘る物理量、例えば波長、空間分布、位相等の情報を超短時間分解で計測可能とする。高速電子加熱では電子系と格子系のエネルギー緩和過程、物質の状態方程式等、多くの物理過程が顕著に結果に現れるので、実験と理論を結合しつつ研究すれば科学的貢献は大きい。工学的には、小型、高繰り返しレーザーによる物質の局所加工が可能になり、産業への大きな波及効果が期待される。また、医療応用においても痛みを伴わない歯の局所アブレーションが研究されている。超強衝撃波では、新物質の探索や超高圧力下物質の状態方程式の決定など基礎科学への貢献が期待される。また衝撃波発生法として超

高速飛翔体加速、高繰り返し発生、高制御性などの特長があり広範な応用が期待される。

参考文献

- 1) 科学技術庁研究開発局：「高密度パルス光の発生と先端の物質制御技術に関する調査」報告書(平成9年3月)及び同中間報告書(平成8年10月)。
- 2) M. Tsunekawa, S. Nishio, and H. Sato: J. Appl. Phys. **76** (1994) 5598.
- 3) K. Kuba and T. Sugihara: Appl. Surf. Sci. **96-98** (1996) 659.
- 4) K. Fukushima, Y. Kanke, and T. Morishita: J. Appl. Phys. **74** (1993) 6948.
- 5) J. T. Dickinson, J.-J. Shin, W. Jiang, and M. G. Norton: J. Appl. Phys. **74** (1993) 4729.
- 6) S. G. Hansen: J. Appl. Phys. **66** (1989) 1411.
- 7) M. Maclar and M. Fajard: Appl. Phys. Lett. **65** (1994) 159.
- 8) T. Gilbert, B. Debreuil, M. E. Barthe, and J. L. Debrun: J. Appl. Phys. **75** (1993) 3506.
- 9) J. Solis, F. Vega, and N. Afonso: J. Appl. Phys. **74** (1993) 4271.
- 10) M. A. Capaso: J. Appl. Phys. **78** (1995) 4790.
- 11) G. N. A. Van Veen: J. Appl. Phys. **60** (1986) 3746.
- 12) S. Preuss, E. Matthias, and M. Stuke: Appl. Phys. **A59** (1994) 79.
- 13) I. W. Schulz, D. Becker, and J. Fanke: J. Phys. D, Appl. Phys. **26** (1993) 1357.
- 14) M. Aden, E. W. Kreutz, and A. Voss: J. Phys. D, Appl. Phys. **26** (1993) 1554.
- 15) E. W. Kreutz and N. Pirsch: SPIE **1276** (1990) 343.
- 16) S. I. Anisimov, V. A. Galburt, and M. F. Ivanov: Sov. Phys. Tech. Phys. **24** (1979) 292.
- 17) B. R. Finke, P. D. Kapadia, and J. M. Dowden: J. Phys. **D23** (1990) 643.
- 18) S. I. Anisimov, M. Tribelskii, and Ya. G. Epelbaum: Sov. Phys. JETP **51** (1980) 802.
- 19) T. Yabe, T. Mochizuki, and H. Hara: LAMP **92** (1992) 387.
- 20) T. Yabe and T. Aoki: Comput. Phys. Commun. **66** (1991) 219.
- 21) T. Yabe: Rev. Laser Eng. **20** (1992) 691.
- 22) T. Yabe: Shock Waves **1** (1991) 187.
- 23) T. Yabe, H. Hoshino, and T. Tsuchiya: Phys. Rev. **A44** (1991) 2756.
- 24) T. Yabe and F. Xiao: Nucl. Eng. and Design **155** (1995) 45.
- 25) T. Yabe, T. Aoki, M. Tajima, F. Xiao, S. Sasaki, Y. Yabe, and J. Watanabe: Geophys. Res. Lett. **22** (1995) 2429.
- 26) V. Y. Baladin, R. Niedrig, and O. Bostanjoglo: J. Appl. Phys. **77** (1995) 135.
- 27) V. Mazuhukin, I. Smulov, C. Dupuy, and D. Jeandel: Num. Heat Trans. Part A-Applications **26** (1994) 587.
- 28) V. Mazuhukin, I. Smulov, and G. Flamant: J. Comp. Phys. **12** (1994) 78.
- 29) V. Mazuhukin, I. Smulov, and G. Flamant: J. de Phys. **IV4** (1994) 119.
- 30) M. Kuzma, M. Pociask, A. Wal, E. Sheregii, and J. Smela: Model Simu. Materials Science and Eng. **2** (1994) 329.
- 31) G. J. Toth, T. Szakacs, and A. Lorincz: Materials Science and Eng., B-Solid State Materials for Advanced Tech. **18** (1993) 281.
- 32) M. Gerstmann, A. Sagi, A. Avidorzhavi, A. Katzir, and S. Akselrod: Optical Eng. **32** (1993) 298.
- 33) D. C. Yu: Optical Eng. **32** (1993) 298.
- 34) D. Bauerle, N. Arnold, and R. Kullmer: Asc Symposium Series **530** (1993) 250.
- 35) A. A. Uglov, I. Y. Smurov, K. I. Taguirov, and A. G. Guakov: Inter. J. Heat and Mass Trans. **35** (1992) 783.
- 36) H. D. Gai and G. A. Voth: J. Appl. Phys. **71** (1992) 1415.
- 37) T. Nakayuki and K. Takahashi: Japanese J. Appl. Phys. Part-1 **30** (1991) 265.
- 38) K. Loudiyi and B. J. Ackerson: Physica **A184** (1992) 26.
- 39) P. B. Corkum: Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 1994.
- 40) B. Piroux, A. Lhuillier, and K. Rzaewski, eds. *Super-Intense Laser-Atom Physics* (Plenum, New York 1993).
- 41) R. Srinivasan, E. Sutcliffe, and B. Braren: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 1285.

- 42) H. Kumagai, K. Midorikawa, K. Toyoda, S. Nakamura, T. Okamoto, and M. Obara: Appl. Phys. Lett. **6** (1994) 1850.
- 43) T. Jahasz, G. Kastis, C. Suarez, Z. Bor, and W. E. Bron: *Proc. Conf. Laser and Electro-Optics '95* **295** (QELS'95 Baltimore 1995).
- 44) J. R. Marques, J. P. Geindre, F. Amiranoff, P. Audebert, J. C. Gauthier, A. Antonetti, and G. Grillon: Phys. Rev. Lett. **76** (1996) 3566.
- 45) H. Daido, Y. Kato, K. Murai, S. Ninomiya, R. Kodama, H. Takabe, and F. Koike: *Proc. QELS'95* **223** (QELS'95 Baltimore 1995).
- 46) 松下 知宏, 児玉 了祐, 池田 直美, 宮永 憲明, 加藤 義章, 香取 良政, 岩井 忠之, 武士 邦雄: テレビジョン学会技術研究会報告 **IPU95-26** (1995) 7.
- 47) H. Shiraga, M. Heya, A. Fujishima, O. Maegawa, K. Shimada, Y. Kato, T. Yamanaka, and S. Nakai: Rev. Sci. Instrum. **66** (1995) 722.
- 48) F. Henneberger, S. Schmitt-Rink, and E. O. Goebel ed.: *Optics of Semiconductors Nanostructures* (Academic Verlag, Berlin 1993).
- 49) B. A. Hammel, C. J. Ceane, J. D. Kilkenny, O. L. Landen, D. B. Ress, P. Bell, R. Pasha, R. J. Wallacw, and D. K. Bradley: Plasma Phys. Control Nuclear Fus. **3** (1993) 215.
- 50) A. H. Chin, R. W. Schoenlein, T. E. Glover, C. V. Shank, W. P. Leemans, P. Volfbeyn, R. Govil, K. J. Kim, and S. Chattopadhyay: *Proc. QELS'96* **68** (QELS'96 Anaheim, 1996).
- 51) E. Constant, H. Stapelfeldt, and P. B. Corkum: *Proc. QELS'95* **223** (QELS'95 Baltimore 1995).
- 52) C. W. Siders, S. P. Le Blanc, D. Fisher, T. Takima, M. C. Downer, A. Babine, A. Stepanov, and A. Segeev: *Proc. QELS'96* **68** (QELS'96 Anaheim, 1996).
- 超短高強度光計測関係
- 53) K. Kuroyanagi, T. Urakami, S. Aoshima, Y. Tsuchiya, H. Kondo, S. Watanabe, and G. Mourou: *Int. Workshop on Femtosecond Tech.* **59** (FST'95, Tsukuba 1995).
- 超高速フレーミングカメラ関係
- 54) K. Kinoshita, Y. Inagaki, S. Yamabe, A. Takahashi, H. Ito, M. Koishi, H. Mizushima, T. Hayakawa, and A. Kusumi: *Int. Congress on High-Speed Photography and Photonics*, SPIE **2513** (1994) 40.
- 超短時間光計測関係
- 55) H. Takahashi, T. Urakami, I. Hirano, S. Aoshima, and Y. Tsuchiya: *The Pacific Rim Conf. on Laser Electro-Optics* **218** (CLEO/PR'95 Makhari 1995).
- 56) H. Takahashi, T. Urakami, I. Hirano, S. Aoshima, and Y. Tsuchiya: *Int. Workshop on Femtosecond Tech.* **67** (FST'95, Tsukuba 1995).
- ストリークカメラ関係
- 57) Y. Tsuchiya: IEEE J. Quantum Electron. **QE-20** (1984) 1516.
- 58) Y. Tsuchiya and M. Koishi: *High-speed photography and photonics*, SPIE **1032** (1988) 459.
- 59) Y. Tsuchiya: *Recent advances in the uses of light in physics, chemistry, engineering and medicine*, SPIE **1599** (1991) 244.
- 60) 土屋 裕: 光学 **2** (1993) 390.
- 61) Y. Tsuchiya, E. Inuzuka, T. Kurono, and M. Hosoda: *Advances in Electronics and Electron Physics* **64A** (Academic Press, London 1985) 21.
- 62) Y. Tsuchiya, E. Inuzuka, T. Kurono, and M. Hosoda: J. Imaging Tech. **11** (1985) 215.
- 超高速E-O-Sampling計測関係
- 63) H. Takahashi, S. Aoshima, and Y. Tsuchiya: IEEE Trans. Instrum. Measure. **44** (1995) 965.
- 64) S. Aoshima, H. Takahashi, I. Hirano, and Y. Tsuchiya: *OSA Proc. Picosecond Electronics and Optoelectronics* **9** (1991) 64.
- 65) H. Takahashi, S. Aoshima, and Y. Tsuchiya: *OSA Proc. Picosecond Electronics and Optoelectronics* **9** (1991) 70.
- 超高速電子加熱
- 66) C. Momma, B. N. Chichkov, S. N. Nolte, F. Alvensleben, A. Tunnermann, H. Welling, and B. Wellenhausen: Optics Communications **128** (1996) 101.
- 67) H. M. Michberg, P. R. Freeman, S. C. Davey, and R. M. More: Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 2364.
- 68) D. H. Reitze, H. Ahn, and M. C. Downer: Phys. Rev. **B54** (1992) 2677.
- 69) H. Fiedorowicz, A. Bartnik, M. Szczurek, P. Parys, P. Gelliers, L. Dasilva, S. Mrowka, B. Dane, D. Matthews, and J. Abate: *SPIE Proc. 2528, Application of Laser Plasma Radiation II*, eds. M. C. Richardson, and G. A. Kyralla (SPIE Press, Bellingham, 1995).
- 超強衝撃波技術
- 70) S. I. Anisimov, A. M. Prokhorov, and V. E. Fortov: Sov. Phys. Usp. **27** (1984) 181.
- 71) Y. Kato, K. Mima, N. Miyana, S. Arinaga, Y. Kitagawa, M. Nakatsuka, and C. Yamanaka: Phys. Rev. Lett. **53** (1984) 1057.
- 72) F. Cottet, M. Hallouin, J. P. Romain, R. Fabbro, B. Faral, and H. Repin: Appl. Phys. Lett. **47** (1985) 678.
- 73) G. A. Fisk, G. A. Mastin, and S. A. Sheffield: J. Appl. Phys. **60** (1986) 2266.
- 74) Th. Lower, R. Sigel, K. Edimann, I. B. Foldes, S. Huller, J. Massen, G. D. Tsakiris, S. Witkowski, W. Preuss, H. Nishimura, H. Shiraga, Y. Kato, S. Nakai, and T. Endo: Phys. Rev. Lett. **72** (1994) 3186.
- 75) J. S. Wark and H. He: Laser and Particle Beams **12** (1994) 507.
- 76) M. Koenig, B. Faral, and J. M. Boudenne: Phys. Rev. **E50** (1994) 3314.
- 77) R. Cauble, D. W. Phillon, T. J. Hoover, N. C. Holmes, J. D. Kilkenny, and R. W. Lee: Phys. Rev. Lett. **70** (1995) 2102.
- 78) M. Koenig, B. Faral, J. M. Boudenne, D. Batani, A. Benuzzi, S. Bossi, C. Remond, J. P. Perrine, M. Temporal, and S. Atzeni: Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 2260.
- 79) T. Sekine, Y. Yoshida, and K. A. Tanaka: Advanced Materials'96, NIRIM **29** (1996).

レーザーワード

衝撃波 (shock-wave)

物質中をバルク音速で伝播し、圧力、密度、内部エネルギーが急激に増加する不連続面。この不連続面の前後での質量、運動量、及びエネルギー保存則からランキン-ユゴニオ方程式が成り立ち、通常初期密度、衝撃波速度、粒子速度を測定することで圧力と密度の関係を決定する。衝撃波は非線形現象で、線形波動の場合と異なり、正常反射以外にマッハ反射が起こる。この反射を利用してフォーカシングして強められる。また平面衝撃波の反射を繰り返すことで衝撃インピーダンス(初期密度と衝撃波速

度の積)が大きい物質での反射では段階的に強まり、衝撃インピーダンスが小さい物質での反射では段階的に弱まる。固体や液体の凝縮体に衝撃波を与えると比較的容易に100GPaを超える超高压力の発生が可能であり、物質合成や物質の状態式の決定、超高压力下での物性研究に利用される。衝撃波を利用したダイヤモンド合成や結石破碎などの医療への応用など様々な分野で役立っている。

(関根 利守, 豊田 浩一)